

**Διδακτορική Διατριβή**

Προσομοίωση και Ανάλυση της Συμπεριφοράς υπό Ανεμοπίεση  
και Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Ελαφρών, Εύκαμπτων,  
Περατών Αγροτικών Κατασκευών για Προστατευμένες  
Καλλιέργειες

**Όνομα:** Γιαννούλης Σ. Αναστάσιος

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Μπριασούλης Δημήτριος

**Διδακτορική Διατριβή**

Προσομοίωση και Ανάλυση της Συμπεριφοράς υπό Ανεμοπίεση  
και Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Ελαφρών, Εύκαμπτων,  
Περατών Αγροτικών Κατασκευών για Προστατευμένες  
Καλλιέργειες

**Όνομα:** Γιαννούλης Σ. Αναστάσιος

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Μπριασούλης Δημήτριος

Αθήνα, Ιανουάριος 2010

## **Διδακτορική Διατριβή**

Προσομοίωση και Ανάλυση της Συμπεριφοράς υπό Ανεμοπίεση  
και Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Ελαφρών, Εύκαμπτων,  
Περατών Αγροτικών Κατασκευών για Προστατευμένες  
Καλλιέργειες

**Όνομα:** Γιαννούλης Σ. Αναστάσιος

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Μπριασούλης Δημήτριος

### **Τριμελής επιτροπή:**

- 1) Καθ. Μπριασούλης Δημήτριος
- 2) Καθ. Κίττας Κωνσταντίνος
- 3) Καθ. Μπανιοτόπουλος Χαράλαμπος

### **Επταμελής εξεταστική επιτροπή:**

- 1) Καθ. Μπριασούλης Δημήτριος
- 2) Καθ. Κίττας Κωνσταντίνος
- 3) Καθ. Μπανιοτόπουλος Χαράλαμπος
- 4) Καθ. Παπαδάκης Γεώργιος
- 5) Ομ. Καθ. Κυρίτσης Σπυρίδων
- 6) Λεκτ. Κατσούλας Νικόλαος
- 7) Δρ. Μπαρτζάνας Θωμάς

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασικό αντικείμενο της παρούσας ερευνητικής εργασίας αποτέλεσε η καινοτόμος μελέτη της συμπεριφοράς περατών και μη πλαισίων που αλληλεπιδρούν με τον άνεμο δημιουργώντας ζώνες προστασίας καλλιιεργειών. Το αντικείμενο της μελέτης βασίστηκε στην φυσική παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο τα δέντρα ανταποκρίνονται στη ροή του ανέμου δημιουργώντας ένα δυναμικό σύστημα ανεμοφράκτη. Η δυναμική αυτή συμπεριφορά μελετήθηκε πειραματικά και προσομοιώθηκε αριθμητικά μέσω ελαστικά στηριζόμενων και εύκαμπτων πλαισίων. Εκτενής έλεγχος της διεθνούς βιβλιογραφίας απέδειξε την απουσία αντίστοιχων μελετών.

Παρά την πρόσφατη ραγδαία ανάπτυξη της χρήσης περατών πλαστικών καλυμμάτων (πλαστικά δίχτυα) ως υλικών κάλυψης ελαφρών αγροτικών κατασκευών, ο σχεδιασμός και η χρήση τους γίνεται συνήθως εμπειρικά. Η μελέτη των ιδιοτήτων των περατών καλυμμάτων και ο σχεδιασμός βελτιωμένων αγροτικών κατασκευών μπορεί να αποτελέσει αποφασιστικό βήμα για την ανάπτυξη του τομέα των αγροτικών κατασκευών και την φιλική προς το περιβάλλον προστασία της γεωργικής παραγωγής.

Αρχικά μελετήθηκε η ροή γύρω από ένα υπερυψωμένο σταθερό πλαίσιο, τα φορτία ανέμου πάνω σε αυτό, καθώς και η επίδραση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των περατών υλικών κάλυψης στις δυο αυτές παραμέτρους.

Στη συνέχεια η μελέτη επικεντρώθηκε σε πλαίσια με ελαστική στήριξη αλλά και εύκαμπτα πλαίσια στα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως κάλυψη γεωργικά δίχτυα. Σε κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις με σταθερά μη περατά πλαίσια ίδιας γεωμετρίας, ώστε να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα που μπορούν να προκύψουν: α) από τη χρήση των γεωργικών δικτύων, β) από την ελαστικότητα του πλαισίου και γ) από τον συνδυασμό των δυο προαναφερθέντων καινοτόμων εφαρμογών.

Αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη ώστε να ελεγχθεί η δυνατότητα των μεθόδων αυτών να απεικονίσουν με ακρίβεια τη ροή του ανέμου γύρω από τα αντίστοιχα πλαίσια και να υπολογίσουν τις ανεμοπιέσεις που ασκούνται σε αυτά. Συγκρίσεις των αριθμητικών αποτελεσμάτων με πλήρους κλίμακας πειράματα οδήγησαν στην επιβεβαίωση της αξιοπιστίας τους.

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός πλαισίων που αλληλεπιδρούν δυναμικά μέσω ελαστικής στήριξης ή ελαστικότητας με τον άνεμο, σε συνδυασμό με την χρήση των γεωργικών δικτύων, αποδείχθηκε καινοτόμος κατασκευαστική λύση, ικανή να βελτιώσει την αποδοτικότητα, όσον αφορά την παρεχόμενη προστασία, αλλά και να μειώσει τη καταπόνηση και συνεπώς το κόστος συγκριτικά με τις συνήθεις κατασκευές σταθερών και αδιαπέραστων πλαισίων.

**Επιστημονική Περιοχή:** *Γεωργική Μηχανική / Μηχανική Ανέμου*

**Λέξεις Κλειδιά:** *Φορτία ανέμου, Μορφή ροής ανέμου, Υπερυψωμένο πλαίσιο, Εύκαμπτο πλαίσιο, Ελαστική Στήριξη, Αριθμητική προσομοίωση, Πλήρους κλίμακας πείραμα, Περατά Πλαίσια, Γεωργικά Δίχτυα*

**PHD THESIS TITLE:** Computational Simulation, Analysis and Design Optimization of Light, Flexible and Permeable Agricultural Structures Under Wind Loading, Used for Protected Cultivation

**ABSTRACT**

The objective of this project was the study of elastic or elastically supported, permeable or non-permeable panels, used as protective structures for sensitive crops. Similarly to the flexible tree windbreaks interacting with the wind, elastic panels and elastically supported panels were studied through full-scale experiments and numerical simulations. The design of such structures was optimized with respect to their performance, minimizing wind loads, thus reducing the corresponding cost.

Initially, an elevated panel was studied using permeable or impermeable cladding material. The airflow around a fixed elevated panel was studied, and the wind loads were estimated by analyzing the effect of the aerodynamic characteristics of the permeable agricultural nets on the airflow.

Afterwards, elastically supported and elastic panels that used permeable agricultural nets as cladding materials were investigated. In all studied cases, comparisons were made to fixed panels of similar geometry in order to demonstrate the advantages: a) from the use of agricultural nets, b) from the interaction of the panel with the wind and c) from the combination of both.

Numerical simulations are a relatively new tool for analyzing fluid dynamics problems, quickly developing in the last decades. In all studied cases numerical simulations have been carried out in order to examine whether they are reliable to represent accurately the airflow around all studied panel types, as well as to calculate wind loads. Comparisons of numerical results with the corresponding full-scale experiments led to the estimation of the validity of the numerical methods.

The present results proved that the interaction of elastically supported permeable panels constitute an innovative structural solution for the protection of crops. The protection they provide in their leeward area and the corresponding reduction of wind loads increases while the cost of the structure is reduced, in comparison to the conventional agricultural structures of this type that are impermeable and fixed to the ground.

Results taken from the numerical simulations confirmed the reliability of these methods for the calculation of wind loads on every type of panel (elastically supported, flexible) irrespective of the cladding material case. Numerical results on the airflow pattern around the studied structures were in good agreement with the corresponding full-scale experiments when agricultural nets were used.

**Scientific Area:** *Agricultural Engineering / Wind Engineering*

**Key Words:** *Wind loads; Airflow pattern; Elevated panel; Bending panel; Elastic support; Numerical simulation; Full-scale experiment; Permeable panels; Agricultural nets*

1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Γενικά.....	9
1.2. Παράμετροι που επηρεάζουν τα φορτία ανέμου πάνω σε κατακόρυφα πλαίσια.....	13
1.2.1. Αναλογία πλάτους – ύψους ( $l/h$ ).....	14
1.2.2. Πληρότητα ( $\phi$ ) – Πορώδες ( $p$ ).....	14
1.2.3 Διεύθυνση πρόσπτωσης του ανέμου ( $\rho$ ).....	14
1.2.4 Διάταξη του κατακόρυφου πλαισίου.....	14
1.2.5 Αναλογία απόστασης από το έδαφος ( $h/(z_g+h)$ ).....	14
1.3 Κώδικες σχεδιασμού κατασκευών.....	15
1.3.1 Ευρωπαϊκός κώδικας σχεδιασμού κατασκευών.....	15
1.3.2 Αμερικάνικος κώδικας σχεδιασμού κατασκευών.....	17
1.3.3 Σύγκριση Ευρωπαϊκού και Αμερικάνικου κώδικα σχεδιασμού κατασκευών.....	18
1.4 Ερευνητικές μελέτες στη Διεθνή Βιβλιογραφία.....	23
1.4.1 Φορτία Ανέμου.....	23
1.4.1.1 Αδιαπέραστα κατακόρυφα πλαίσια τοποθετημένα στο έδαφος.....	23
1.4.1.1.1 Αποτελέσματα του μέσου συντελεστή δύναμης στο κεντρικό τμήμα του κατακόρυφου πλαισίου.....	24
1.4.1.1.2 Ο μέσος συντελεστής δύναμης στα ελεύθερα άκρα του κατακόρυφου πλαισίου.....	26
1.4.1.1.3 Ο μέσος συντελεστής δύναμης στα άκρα ενός κατακόρυφου πλαισίου με γωνίες.....	28
1.4.1.1.4 Ο μέσος συντελεστής δύναμης για όλη την επιφάνεια του κατακόρυφου πλαισίου.....	29
1.4.1.1.5 Μέγιστες τιμές συντελεστή δύναμης.....	29
1.4.1.2 Ο μέσος συντελεστής δύναμης σε περατά κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος.....	30
1.4.1.2.1 Ο μέσος συντελεστής δύναμης για κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος με διαφορετικό πορώδες.....	31
1.4.1.2.2 Ο μέσος συντελεστής δύναμης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου.....	35

1.4.1.3	Περατά και μη περατά υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια.....	35
1.4.1.3.1	Αδιαπέραστα υπερυψωμένα πλαίσια με διαφορετικές τιμές αναλογίας απόστασης από το έδαφος ( $clearance\ ratio=h/(z_g+h)$ ).....	36
1.4.1.3.2	Ο μέσος συντελεστής δύναμης σε υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια για διαφορετικές διευθύνσεις προσπίπτοντος ανέμου.....	38
1.4.1.3.3	Ο μέσος συντελεστής δύναμης σε υπερυψωμένα πλαίσια με διαφορετικό πορώδες.....	38
1.4.2	Η ροή γύρω από τα περατά ή μη κατακόρυφα πλαίσια.....	38
2.	Μελέτη και ανάλυση της ροής του ανέμου γύρω από ένα υπερυψωμένο πλαίσιο για διαφορετικές τιμές πορώδους, με τη βοήθεια πλήρους κλίμακας πειράματος και τρισδιάστατης αριθμητικής προσομοίωσης.....	42
2.1	Πείραμα πλήρους κλίμακας.....	43
2.2	Χαρακτηριστικά του ανέμου.....	45
2.3	Αριθμητική Προσομοίωση του προβλήματος.....	48
2.4	Μοντελοποίηση της τύρβης.....	51
2.5	Οριακές Συνθήκες.....	51
2.6	Προσομοίωση των γεωργικών διχτυών ως περατά υλικά.....	52
2.7	Αποτελέσματα.....	53
2.7.1	Αποτελέσματα ταχυτήτων ανέμου.....	54
2.7.2	Χρήση της αριθμητικής προσομοίωσης για την ανάλυση της υπήνεμης ροής.....	61
3.	Πλήρους κλίμακας πείραμα και δυσδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των φορτίων ανέμου σε ένα κατακόρυφο πλαίσιο, περατής ή μη κάλυψης, με ελαστική στήριξη.....	67
3.1	Πειράματα πλήρους κλίμακας.....	68
3.2	Αριθμητική Προσομοίωση του προβλήματος.....	74
3.3	Μοντελοποίηση της τύρβης.....	75
3.4	Οριακές συνθήκες – Προσομοίωση γεωργικών διχτυών ως περατά υλικά... ..	75
3.5	Σύνθετη ανάλυση αριθμητική προσομοίωσης και μη – γραμμικής ανάλυσης.....	76
3.6	Αποτελέσματα.....	78

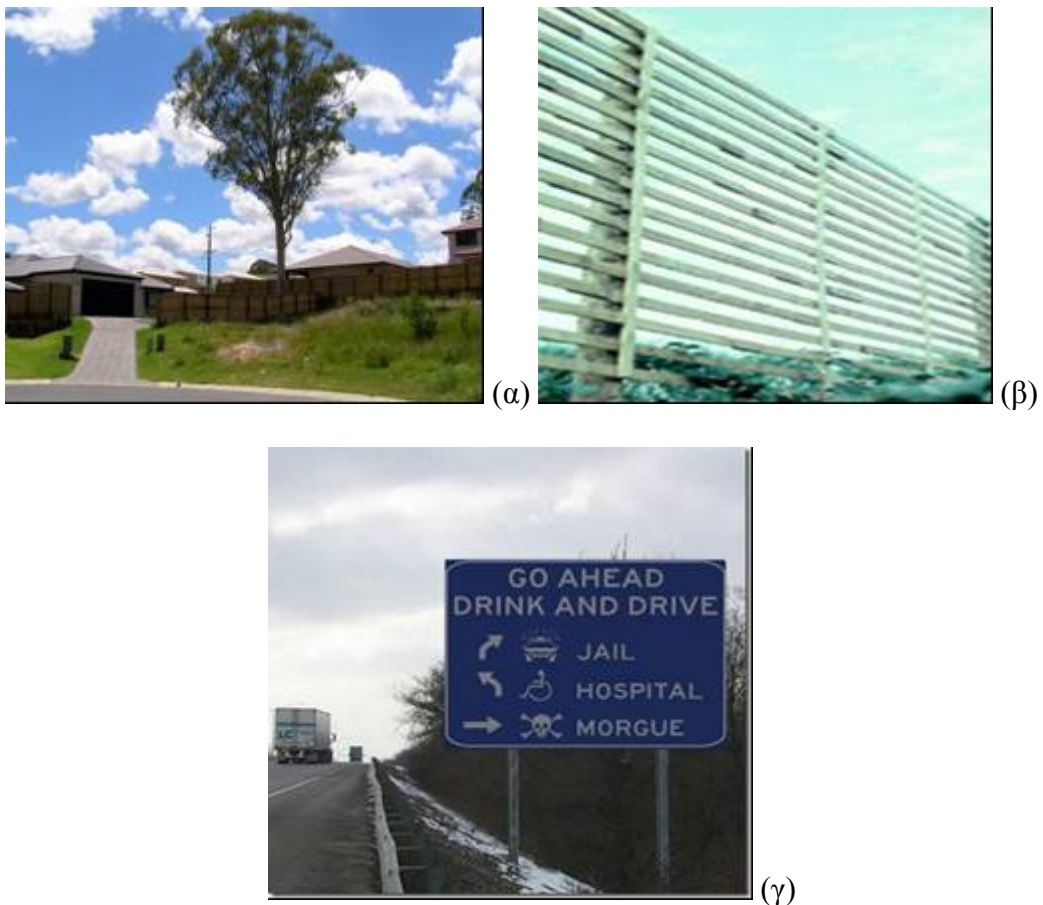
3.6.1 Προσομοίωση του δυναμικού φαινομένου – Εκτίμηση αξιοπιστίας του μοντέλου προσομοίωσης.....	78
3.6.2 Χρήση της αριθμητικής προσομοίωσης για τον υπολογισμό των πιέσεων και των εντατικών μεγεθών πάνω στο πλαίσιο ελαστικής στήριξης .....	86
4. Δυσδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των φορτίων ανέμου και εύκαμπτων περατών και μη πλαισίων.....	91
4.1 Γενικά.....	91
4.2 Αριθμητική Προσομοίωση του προβλήματος.....	92
4.3 Μοντελοποίηση της τύρβης για το ρευστοδυναμικό μοντέλο.....	94
4.4 Οριακές συνθήκες.....	95
4.5 Αριθμητική προσομοίωση του ρευστοδυναμικού μοντέλου και της απόκρισης-κάμψης του πλαισίου.....	95
4.6 Αποτελέσματα.....	96
4.6.1. Σύγκριση εύκαμπτου μη περατού πλαισίου με αντίστοιχης γεωμετρίας δόσκαμπτο πλαίσιο.....	96
4.6.2. Σύγκριση εύκαμπτου περατού και μη περατού πλαισίου.....	100
4.6.3. Προστατευτική ικανότητα ( <i>shelter effect</i> ) των τύπων πλαισίων που μελετήθηκαν.....	106
5. Συμπεράσματα.....	109
5.1. Συμπεράσματα από τον έλεγχο της διεθνούς βιβλιογραφίας.....	109
5.2 Έρευνα.....	110
5.2.1 Συμπεράσματα της μελέτης της αλληλεπίδρασης του ανέμου με σταθερό υπερυψωμένο πλαίσιο με διαφορετική τιμή πορώδους.....	111
5.2.2 Συμπεράσματα της μελέτης της αλληλεπίδρασης του ανέμου με πλαίσιο το οποίο μπορεί να στραφεί γύρω από σταθερό άξονα.....	113
5.2.3 Συμπεράσματα της μελέτης της αλληλεπίδρασης του ανέμου με εύκαμπτο πλαίσιο.....	115
5.3 Καινοτομικά Στοιχεία – Βασικοί Στόχοι.....	116
6. Αναφορές.....	119



## 1. Εισαγωγή

### 1.1. Γενικά

Από τις παλαιότερες και πιο εύχρηστες κατασκευές που έχουν χρησιμοποιηθεί και ακόμη χρησιμοποιούνται στη γεωργία είναι τα κατακόρυφα πλαίσια. Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός κατακόρυφου πλαισίου, τα οποία και οδήγησαν στην κατά κόρον χρήση τους, ήταν το πολύ χαμηλό κόστος της αλλά και η ευκολία στην κατασκευή τους. Οι κατασκευές αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις διαφορετικούς τύπους. Τα αδιαπέραστα κατακόρυφα πλαίσια τοποθετημένα στο έδαφος, πιο γνωστά ως τοίχοι είτε ανεμοφράκτες, τα περατά κατακόρυφα πλαίσια, με τους φράκτες να αποτελούν το πιο κοινό παράδειγμα τέτοιων κατασκευών και τελευταία κατηγορία τα υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια. Η τελευταία κατηγορία πλαισίων μπορεί να είναι περατά είτε μη περατά πλαίσια (Εικόνα 1).



**Εικόνα 1.** Διάφοροι τύποι κατακόρυφων πλαισίων: α) αδιαπέραστο πλαίσιο για προστασία περιουσίας, β) κλασικό περατό πλαίσιο (ανεμοφράκτης) στη γεωργία στ) πινακίδα οδικής σήμανσης – υπερυψωμένο κατακόρυφο πλαίσιο.

Αρχικά, τα κατακόρυφα πλαίσια έβρισκαν εφαρμογή μόνο στη γεωργία και ως μέσα προφύλαξης περιουσίας. Τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει επεκταθεί σημαντικά (Εικόνα 2). Όπως προαναφέρθηκε, η απλότητα μιας τέτοιας κατασκευής όπως επίσης και το χαμηλό κόστος της, συγκριτικά με άλλες πιο περίπλοκες κατασκευές, την καθιστά ως ένα πραγματικά αποδοτικό μέσο αντιμετώπισης προβλημάτων που ο άνεμος μπορεί να προκαλέσει, σε πολλούς διαφορετικούς τομείς.

Σήμερα φυσικά, ακόμη χρησιμοποιούνται εντατικά στη γεωργία αλλά οι πολλές και διαφορετικές εφαρμογές των κατακόρυφων πλαισίων αποτελούν χειροπιαστή απόδειξη της σημαντικότητας μιας τέτοιας κατασκευής. Είναι πλέον πολύ συνήθης η χρήση τους ως μέσο προστασίας από τη σκόνη, το χαλάζι, το χιόνι και τα έντομα. Επίσης χρησιμοποιούνται και ως μέσα σκίασης. Περαιτά κατακόρυφα πλαίσια χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των ανωτέρω προβλημάτων, τα οποία είναι λιγότερο ή περισσότερο πορώδη, βάσει του υπό αντιμετώπιση προβλήματος κάθε φορά. Επιπρόσθετα, υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια βρίσκουν εφαρμογή ως πινακίδες του κώδικα οδικής κυκλοφορίας είτε ως διαφημιστικές ταμπέλες και πινακίδες. Τα τελευταία χρόνια, μια αρκετά συνηθισμένη εφαρμογή των αδιαπέραστων κατακόρυφων πλαισίων, που θα μπορούσε εύκολα κανείς να παρατηρήσει σε εθνικές οδούς και μεγάλους δρόμους γενικότερα, αποτελούν τα φράγματα ήχου (sound barriers). Τέλος, ένα σχετικά νέο πρόβλημα, το οποίο ονομάζεται “άνεση των πεζών” (pedestrian comfort), παρατηρείται στις μεγαλουπόλεις κοντά σε αρκετά ψηλά κτίρια. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς πιέσεων που παρατηρείται σε διαφορετικά ύψη του κτιρίου. Λόγω αυτού, μεγάλες επιταχύνσεις ανέμου προκαλούνται στη βάση του κτιρίου με αποτέλεσμα τη δυσκολία των πεζών ακόμη και στην κίνηση. Η έκταση του αστικού αυτού προβλήματος μπορεί να ελαττωθεί με τη χρήση περατών πλαισίων στην περιοχή κοντά στα πολύ ψηλά αυτά κτίρια.



**Εικόνα 2.** Σύγχρονες χρήσεις κατακόρυφων πλαισίων: α) Προστασία από μεταφορά υλικού σε βιομηχανική περιοχή, β) Προστασία από έντομα – μέσο σκίασης, γ) Διαφημιστικές πινακίδες – φράγματα ήχου (sound barriers)

Δυο είναι οι βασικοί παράγοντες που πρέπει απαραίτητα να λαμβάνονται υπόψη κατά την κατασκευή ενός κατακόρυφου πλαισίου. Τα φορτία ανέμου τα οποία δέχεται

το πλαίσιο και η προστασία που είναι δυνατό να παρέχει στην υπήνεμη περιοχή του (shelter effect). Άλλωστε, συνήθως τέτοιου είδους κατασκευές βρίσκονται εκτεθειμένες σε υψηλής έντασης ανέμους κι αυτό προκύπτει απλά και μόνο διότι ο λόγος δημιουργίας τέτοιων κατασκευών είναι για να μειώσουν τους δυνατούς ανέμους είτε να προστατέψουν από ισχυρούς ανέμους κάτι το οποίο βρίσκεται στην υπήνεμη περιοχή τους. Η γνώση των φορτίων ανέμου θα επιτρέψει την παροχή ασφάλειας του ανθρωπίνου δυναμικού αλλά και την αποφυγή οικονομικών απωλειών, ενώ από την άλλη, η γνώση της προστασίας που είναι ικανό να προσφέρει ένα πλαίσιο προσδιορίζει ουσιαστικά στην αποδοτικότητά του. Είναι δεδομένο πως οι παράγοντες αυτοί είναι αλληλένδετοι καθώς ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός τους παρέχει τη βέλτιστη κατασκευή ενός κατακόρυφου πλαισίου.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει εκτεταμένη αναφορά σε κατακόρυφα πλαίσια το οποία βρίσκονται τοποθετημένα στο έδαφος. Η πλειονότητα των μελετών αυτών αναφέρεται σε αδιαπέραστα κατακόρυφα πλαίσια [1-11]. Εκτεταμένη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί για τις συγκεκριμένες κατασκευές και αναλυτικά αποτελέσματα για την κατανομή των φορτίων ανέμου πάνω στην επιφάνεια ενός αδιαπέραστου πλαισίου έχουν παρουσιαστεί. Ερευνητική δουλειά σχετικά με τα περατά κατακόρυφα πλαίσια έχει επίσης πραγματοποιηθεί, αλλά όχι στην ίδια έκταση με την προηγούμενη κατηγορία [12-17]. Στην κατηγορία αυτή το κύριο πρόβλημα είναι ότι συγκρίσεις δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν. Ο λόγος για τον οποίο προκύπτει αυτό είναι το διαφορετικό πορώδες των υπό μελέτη πλαισίων. Μετά από αρκετή έρευνα, σήμερα ακόμη δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη διαδικασία για τον υπολογισμό της μείωσης των φορτίων ανέμου σε περατά πλαίσια σε σχέση μόνο με το πορώδες τους. Προτάσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος υπάρχουν σε αρκετές προηγούμενες ερευνητικές μελέτες αλλά δεν υπάρχει συμφωνία ανάμεσα στις προτάσεις αυτές. Η μορφή (form) του περατού μέσου μοιάζει να είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που δεν έχει ληφθεί συστηματικά υπόψη από προηγούμενες μελέτες αλλά και κατασκευαστικούς κώδικες.

Αντίθετα, με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες των κατακόρυφων πλαισίων, πολύ λίγες πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν από τη διεθνή βιβλιογραφία για τα υπερυψωμένα πλαίσια [18-20]. Πολύ λίγες ερευνητικές μελέτες ασχολήθηκαν με τέτοιου είδους κατασκευές και ακόμη λιγότερες είναι οι υπάρχουσες πληροφορίες για περατά υπερυψωμένα πλαίσια.

Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζεται επίσης και εκτεταμένη έρευνα γύρω από το θέμα της προστασίας της υπήνεμης περιοχής ενός πλαισίου [29-38]. Στις περισσότερες μελέτες, κύριος στόχος είναι η σύγκριση περατών και μη περατών κατακόρυφων πλαισίων που βρίσκονται στο έδαφος, όσο αφορά την προστασία που δύνανται να παρέχουν. Είναι προφανές πως τα περατά πλαίσια που συγκρίνονται δεν είναι πολύ υψηλού πορώδους. Το γεγονός πως τα περατά πλαίσια αποτελούν οικονομικότερη λύση από τα αδιαπέραστα, είναι ο βασικός λόγος που οδήγησε σε τέτοιου είδους συγκρίσεις. Τα υπερυψωμένα πλαίσια δεν έχουν κατά το κύριο λόγο προστατευτικό ρόλο και δεν έχει μελετηθεί ιδιαίτερα η προστασία της υπήνεμης περιοχής τους.

Οι κατασκευαστικοί κώδικες [21, 22] παρουσιάζουν επίσης πληροφορίες για φορτία ανέμου πάνω σε κατακόρυφα πλαίσια. Αντίστοιχα με τη διεθνή βιβλιογραφία, περισσότερες πληροφορίες αφορούν τα κατακόρυφα πλαίσια που είναι τοποθετημένα στο έδαφος και λιγότερες τα περατά και υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια. Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, οι κατασκευαστικοί κώδικες παρουσιάζουν ελλείψεις, δεν λαμβάνουν υπόψη όλους τους παράγοντες και τις παραμέτρους που επηρεάζουν τα φορτία ανέμου πάνω σε κατακόρυφα πλαίσια και μοιάζουν να είναι συντηρητικοί σε αρκετές περιπτώσεις. Συγκρίσεις ανάμεσα στους κώδικες κατασκευής και

προηγούμενες ερευνητικές μελέτες θα δείξουν ότι βρίσκονται σε συμφωνία σε κάποιες περιπτώσεις, ιδιαίτερα του αδιαπέραστου κατακόρυφου πλαισίου στο έδαφος, αλλά όταν παράμετροι όπως το πορώδες εμπλέκονται, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι αρκετά διαφορετικά και η ανάλυση των κατασκευαστικών κωδίκων δεν είναι τόσο λεπτομερής και αξιόπιστη όσο θα έπρεπε.

Η έλλειψη εκτεταμένων πληροφοριών και η ασυμφωνία ανάμεσα σε ερευνητικές μελέτες και τους κώδικες κατασκευής οδήγησε στο ένα από τα δύο τμήματα της παρούσας εργασίας. Ο ανεπαρκής αριθμός μελετών υπερυψωμένων κατακόρυφων πλαισίων και ιδιαιτέρως περατών υπερυψωμένων πλαισίων απαιτούσε την περαιτέρω έρευνα πάνω στα συγκεκριμένα θέματα. Στο τμήμα αυτό, δυο διαφορετικού τύπου μελέτες πραγματοποιήθηκαν στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών και είχαν στόχο τη μελέτη ενός υπερυψωμένου κατακόρυφου πλαισίου με τρεις διαφορετικές περατότητες (0%, 38% και 62%). Τα περατά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως κάλυψη των υπερυψωμένων πλαισίων ήταν γεωργικά δίχτυα, ενώ η αδιαπέραστη κάλυψη έγινε με τη βοήθεια πλαστικού. Σε ένα πλήρους κλίμακας πείραμα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φορτίων ανέμου καθώς και ταχυτήτων ανέμου για την εξαγωγή και απεικόνιση του πεδίου ροής του γύρω από το πλαίσιο. Με τη βοήθεια τρισδιάστατης αριθμητικής προσομοίωσης μελετήθηκε επίσης η ίδια κατασκευή και μετρήθηκαν τα αντίστοιχα μεγέθη. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τους δυο αυτούς τρόπους μελέτης τέθηκαν υπό σύγκριση μεταξύ τους όπως επίσης με τη διεθνή βιβλιογραφία και κώδικες σχεδιασμού κατασκευών. Οι κώδικες σχεδιασμού κατασκευών που αναφέρονται και συγκρίνονται στην παρούσα εργασία είναι ο Ευρωπαϊκός κώδικας (Eurocode 1-1-4) [21] και ο Αμερικανικός κώδικας (ASCE/SEI 7-05) [22].

Βασικοί στόχοι του ανωτέρω τμήματος της εργασίας, ήταν η παρουσίαση νέων αποτελεσμάτων για υπερυψωμένα πλαίσια και η συνεισφορά στον μικρό αριθμό δεδομένων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία αλλά και των ελλείψεων που εμφανίζονται σε κώδικες σχεδιασμού. Επίσης, η σύγκριση, όπου είναι εφικτή, με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα από τις δυο πηγές που προαναφέρθηκαν (βιβλιογραφία και κώδικες σχεδιασμού), για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας τους, είναι ακόμη κάτι στο οποίο αποσκοπεί η μελέτη αυτή.

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις είναι μια σχετικά πρόσφατη μέθοδος μελέτης ρευστοδυναμικών προβλημάτων. Είναι ένα αρκετά φθινό και γρήγορο εργαλείο το οποίο είναι δυνατό σήμερα να παρέχει μια πλήρη ανάλυση τέτοιων φαινομένων και σε πολλές περιπτώσεις να παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, δεν κρίνεται ακόμη ως πλήρως αξιόπιστο, παρά την σημαντική εξέλιξη του τομέα αυτού τα τελευταία χρόνια, συγκριτικά με τα πλήρους κλίμακας πειράματα ή τα πειράματα σε ανεμοσήραγγα. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη εργασία αυτή από την αριθμητική προσομοίωση του υπερυψωμένου πλαισίου τίθενται άμεσα σε σύγκριση με τις μετρήσεις του πλήρους κλίμακας πειράματος. Η σύγκριση αυτή έχει ως απώτερο σκοπό να αναδείξει την αξιοπιστία και εγκυρότητα των αποτελεσμάτων για περατά κατακόρυφα πλαίσια, η οποία θα προκύψει από την σωστή προσομοίωση περατού υλικού. Για τα αδιαπέραστα κατακόρυφα πλαίσια στόχος ήταν να εξαχθούν μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, μιας και είναι γνωστό πως σε τέτοιες περιπτώσεις τα έντονα τυρβώδη φαινόμενα που υπάρχουν δεν μπορούν να προσομοιωθούν απόλυτα.

Όλα τα παραπάνω αφορούν αποκλειστικά και μόνο κατακόρυφα πλαίσια τα οποία είναι κάθετα στο επίπεδο του εδάφους. Στο δεύτερο τμήμα της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται αποτελέσματα που προήλθαν από πλήρους κλίμακας πείραμα αλλά και αριθμητική προσομοίωση πλαισίου στο έδαφος του οποίου επιτρέπεται η στροφή περί την βάση ανάλογα με την ένταση του ανέμου με τη χρήση

ελαστικής στήριξης. Μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις τιμών πορώδους του πλαισίου, 0%, 38% και 62%, όπως και στο πρώτο πειραματικό μέρος της εργασίας για το υπερυψωμένο πλαίσιο. Η περατή κάλυψη ήταν και πάλι γεωργικά δίχτυα, ενώ η αδιαπέραστη κάλυψη, πλαστικό. Η λειτουργία της ελαστικής στήριξης βασίζεται στη χρήση ελατηρίων συγκεκριμένης σταθεράς της οποίας η τιμή έχει καθοριστεί σύμφωνα με τις ανάγκες του πειράματος πλήρους κλίμακας. Μελετήθηκε η αεροδυναμική και μηχανική συμπεριφορά του πετάσματος υπό διαφορετικές γωνίες κλίσης ισορροπίας του πετάσματος.

Στόχος είναι να παρουσιαστεί και αναδειχθεί το υψηλό ποσοστό μείωσης των ανεμοπιέσεων και των εντατικών μεγεθών για ένα πέτασμα στο οποίο δίνεται η δυνατότητα να μεταβάλλει την κλίση του μέσω της ελαστικής του στήριξης, σε αλληλεπίδραση με την ταχύτητα του ανέμου. Κυρίως για γωνίες μεγαλύτερες των  $30^\circ$  όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια της εργασίας παρατηρούνται σημαντικές μειώσεις. Στα πλαίσια των σχεδιαστικών αναγκών που περιλαμβάνουν και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός ανεμοφράκτη, που είναι η κάλυψη της υπήνεμης περιοχής του (shelter effect), δεν έγινε μελέτη για πολύ μεγάλες γωνίες ( $\theta \leq 50^\circ$ ).

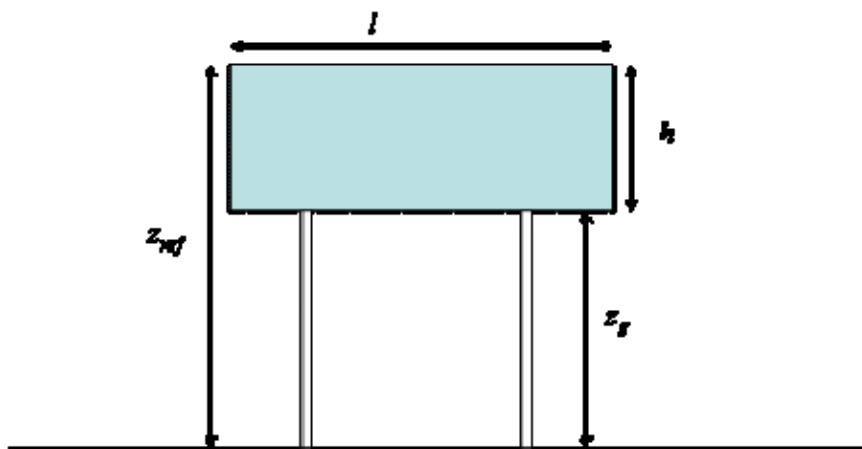
Και στο δεύτερο τμήμα της εργασίας πραγματοποιήθηκε σύγκριση πλήρους κλίμακας μετρήσεων και αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης. Στην περίπτωση αυτή η αριθμητική μέθοδος σε συνδυασμό με μη-γραμμική ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε, έδωσε αποτελέσματα της ανάλυσης της αλληλεπίδρασης του ανέμου με το ελαστικής στήριξης πλαίσιο. Στόχος και πάλι ήταν η επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης.

Η τελευταία ενότητα της εργασίας αυτής, περιλαμβάνει συμπεράσματα που εξήχθησαν και από τις δυο πειραματικές απόπειρες.

## ***1.2. Παράμετροι που επηρεάζουν τα φορτία ανέμου πάνω σε κατακόρυφα πλαίσια***

Παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τα φορτία ανέμου πάνω σε κατακόρυφα πλαίσια, όπως έχει αποδειχθεί από προηγούμενες ερευνητικές μελέτες που έχουν δημοσιευθεί σε έγκυρα επιστημονικά περιοδικά.

Το κάτωθι σχέδιο βοηθά στον ορισμό των παραμέτρων αυτών. Οι συμβολισμοί επιλέχθηκε να είναι ίδιοι με αυτούς που προτείνει ο Ευρωπαϊκός κατασκευαστικός κώδικας (Eurocode 1-1-4) [21].



**Εικόνα 3.** Κατακόρυφα πλαίσια. Ορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

### 1.2.1. Αναλογία πλάτους – ύψους ( $l/h$ )

Είναι ο λόγος του πλάτους ( $l$ ) προς το ύψος του κατακόρυφου πλαισίου ( $h$ ). Κάνοντας χρήση των συμβόλων της *Εικόνας 3*, αυτή η αναλογία ορίζεται ως  $l/h$ .

### 1.2.2. Πληρότητα ( $\phi$ ) – Πορώδες ( $p$ )

Η πληρότητα ορίζεται ως:

$$\phi = \frac{A}{A_c} \quad (1)$$

όπου  $A$  είναι το σύνολο των μη διαπερατών μελών (π.χ οι ίνες των γεωργικών διχτυών) του κατακόρυφου πλαισίου και  $A_c$  είναι η συνολική επιφάνεια της πρόσωσης του κατακόρυφου πλαισίου.

Το πορώδες είναι ακριβώς το αντίθετο και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$p = 1 - \frac{A}{A_c} = 1 - \phi \quad (2)$$

Οι τιμές αυτές μπορούν να παρουσιαστούν και με τη μορφή επί τοις εκατό ποσοστών. Για παράδειγμα, ένα περατό πλαίσιο τιμής πορώδους ίσης με 0,2 μπορούμε να πούμε να πούμε ότι είναι 20% πορώδες.

### 1.2.3 Διεύθυνση πρόσπτωσης του ανέμου ( $\theta$ )

Είναι η σχετική γωνία του ανέμου όσο αφορά τη θέση του κατακόρυφου πλαισίου. Με βάση τους κατασκευαστικούς κώδικες όπως και τις περισσότερες προηγούμενες μελέτες, πραγματοποιείται η υπόθεση ότι η πρόσπτωση του ανέμου κάθετα στην επιφάνεια του πλαισίου αντιστοιχεί σε γωνία  $\theta$ . Όταν η διεύθυνση του ανέμου είναι παράλληλη προς την επιφάνεια του κατακόρυφου πλαισίου τότε η γωνία πρόσπτωσης θεωρείται ίση με  $90^\circ$ .

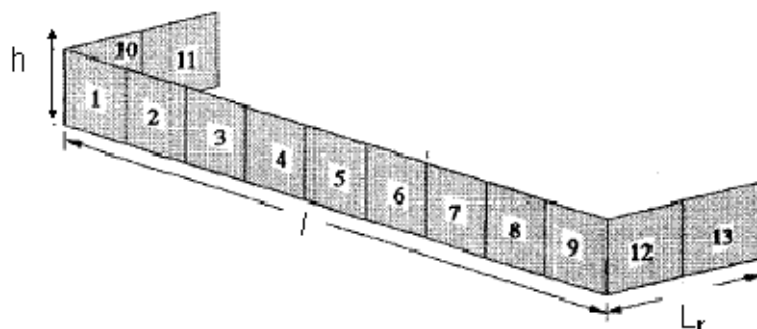
### 1.2.4 Διάταξη του κατακόρυφου πλαισίου

Τα κατακόρυφα πλαίσια είναι πιθανό να έχουν δυο διαφορετικές διατάξεις. Υπάρχουν τα κατακόρυφα πλαίσια που τα άκρα τους είναι ελεύθερα αλλά και αυτά που τα άκρα τους δεν είναι ελεύθερα αλλά η κατασκευή συνεχίζει σχηματίζοντας γωνίες (*Εικόνα 4*). Η διάταξη του πλαισίου με γωνίες στα ελεύθερα άκρα (return corners) είναι μια προσπάθεια ώστε αν μειωθούν τα υψηλά φορτία που προκύπτουν στα άκρα ενός αδιαπέραστου κατακόρυφου πλαισίου στο έδαφος, όταν αυτά είναι ελεύθερα (free ends), όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στη συνέχεια.

### 1.2.5 Αναλογία απόστασης από το έδαφος ( $h/(z_g+h)$ )

Είναι προφανές ότι η αναλογία απόστασης από το έδαφος επηρεάζει μόνο τα υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια και σχετίζεται άμεσα με την απόσταση της κατασκευής από το έδαφος. Ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του κατακόρυφου πλαισίου ( $h$ ) προς το συνολικό έδαφος του άνω άκρου του πλαισίου από το έδαφος ( $z_g+h$ ). Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως για  $z_g=0$ , το οποίο συνεπάγεται  $h/(z_g+h)=1$ , το

πλαίσιο παύει να είναι υπερυψωμένο και οδηγούμαστε στην περίπτωση του κατακόρυφου πλαισίου στο έδαφος.



**Εικόνα 4.** Αδιαπέραστο κατακόρυφο πλαίσιο στο έδαφος με γωνίες στα άκρα του [7].

### 1.3 Κώδικες σχεδιασμού κατασκευών

Οι κώδικες σχεδιασμού κατασκευών επίσης παρέχουν πληροφορίες για φορτία ανέμου πάνω σε κατακόρυφα πλαίσια για κάθε μια από τις περιπτώσεις που είδαμε να υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία. Όπως και στην περίπτωση των ερευνητικών μελετών, περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν και στους κώδικες για αδιαπέραστα κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος και λιγότερες για περατά και υπερυψωμένα πλαίσια. Δύο διαφορετικοί κώδικες σχεδιασμού εξετάστηκαν στην εργασία αυτή. Ο Ευρωπαϊκός (Eurocode-1-1-4 [21]) και ο Αμερικάνικος κώδικας σχεδιασμού (ASCE/SEI 7-05 [22]). Και οι δυο κώδικες παρέχουν συντελεστές δύναμης ( $c_f$ ) είτε συντελεστές συνολικής πίεσης ( $c_{p-net}$ ) για φορτία ανέμου πάνω σε κατακόρυφα πλαίσια. Οι ορισμοί των προαναφερθέντων συντελεστών δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$c_{p-net} = \frac{P_{net}}{\frac{1}{2} \rho V_{z_{ref}}^2} \quad (3)$$

και

$$c_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V_{z_{ref}}^2 A_{ref}} \quad (4)$$

Όπου  $A_{ref}$  είναι η επιφάνεια αναφοράς ίση με  $l \cdot h$  και  $z_{ref}$  είναι το ύψος αναφοράς, στο οποίο μετρείται η ταχύτητα της ανεμώδιστης ροής του ανέμου (μακριά από την κατασκευή) ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η δυναμική πίεση (ο παρονομαστής στην Εξίσωση 3)

#### 1.3.1 Ευρωπαϊκός κώδικας σχεδιασμού κατασκευών (Eurocode 1-1-4)

Στον Ευρωπαϊκό κώδικα σχεδιασμού [21] το αδιαπέραστο κατακόρυφο στο έδαφος πλαίσιο διαιρείται σε δύο, τρία ή τέσσερα διαφορετικά τμήματα βάσει τριών

περιπτώσεων αναλογίας πλάτους – ύψους, τα οποία είναι για  $l/h \leq 3$ ,  $l/h=5$  και  $l/h \geq 10$ . Για κάθε διαχωρισθέν τμήμα αντιστοιχεί και ένας συντελεστής συνολικής πίεσης.

Η μοναδική τιμή πορώδους που εξετάζει ο συγκεκριμένος κώδικας για κατακόρυφα πλαίσια είναι 20% (πληρότητα  $\phi = 80\%$ ). Ο συνολικός συντελεστής πίεσης παρέχεται για τα διάφορα τμήματα του πλαισίου, τα οποία κι εδώ διαχωρίζονται ακριβώς όπως στην περίπτωση του κατακόρυφου αδιαπέραστου πλαισίου στο έδαφος. Για τιμές πορώδους μεταξύ 0% και 20%, μπορούν να εξαχθούν τιμές του συνολικού συντελεστή πίεσης για κάθε τμήμα με τη βοήθεια γραμμικής παρεμβολής (linear interpolation). Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό κώδικα σχεδιασμού [21], περατά κατακόρυφα πλαίσια με τιμή πορώδους μεγαλύτερη του  $p \geq 20\%$  (πληρότητα  $\phi \leq 80\%$ ) θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως δικτυωτές κατασκευές ή σκαλωσιές που αποτελούνται από μέλη με κυκλική διατομή είτε όχι. Στη συνέχεια, θα δειχθεί ότι περατά κατακόρυφα πλαίσια δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως δικτυώματα και οι συνολικοί συντελεστές πίεσης που προκύπτουν δεν είναι δυνατό να χαρακτηριστούν ρεαλιστικοί.

Όλοι οι συντελεστές πίεσης που παρέχονται από τον Ευρωπαϊκό κώδικα [21] σχεδιασμού αντιστοιχούν στην περίπτωση όπου η διεύθυνση του προσπίπτοντος ανέμου επιφέρει τα πιο κρίσιμα φορτία. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη μόνο κάθετες διευθύνσεις ανέμου αλλά και αυτές που προκαλούν κρίσιμα φορτία στα ελεύθερα άκρα ενός πλαισίου, δηλαδή κοντά στην τιμή των  $45^\circ$  (υποθέτοντας γωνία ίση με  $\theta$  για κάθετο άνεμο). Για το κεντρικό τμήμα ενός κατακόρυφου πλαισίου έχει ληφθεί υπόψη η κάθετη διεύθυνση ανέμου η οποία προκαλεί και τις υψηλότερες τιμές ανεμοπιέσεων στο τμήμα αυτό του πλαισίου.

Για την περίπτωση του αδιαπέραστου κατακόρυφου πλαισίου στο έδαφος λαμβάνονται υπόψη και οι δυο πιθανές διατάξεις που ένα πλαίσιο μπορεί να έχει. Αυτό σημαίνει πως ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21] παρέχει αποτελέσματα για πλαίσια με προσαρμοσμένες γωνίες είτε όχι. Για προσαρμοσμένες γωνίες με μήκος  $L_r \geq h$ , παρέχονται τιμές του συνολικού συντελεστή πίεσης για τα διάφορα τμήματα του πλαισίου. Για γωνίες με μήκος μικρότερο του  $h$ , προτείνεται γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό των συντελεστών πίεσης.

Ένα πλαίσιο το οποίο έχει αναλογία πλάτους – ύψους  $l/h \geq 1$ , ορίζεται ως υπερυψωμένο μόνο όταν ισχύει  $z_g \geq h/4$ , δηλαδή όταν το κάτω άκρο απέχει από το έδαφος τουλάχιστο απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με το  $1/4$  του ύψους του. Για περίπτωση που τελευταία συνθήκη δε ικανοποιείται, τότε ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21] ανακατευθύνει τον αναγνώστη στην περίπτωση των κατακόρυφων πλαισίων στο έδαφος. Για την περίπτωση όπου η αναλογία πλάτους – ύψους είναι μικρότερη της μονάδας ( $l/h \leq 1$ ), το πλαίσιο θεωρείται ως υπερυψωμένο ακόμη και για  $z_g \leq h/4$ .

Για τα υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια, όπως ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21] παρέχει μία μόνο τιμή συντελεστή δύναμης ίση με  $c_f = 1.80$ . Η τιμή αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιείται με μεγάλη προσοχή διότι ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21] ορίζει ως ύψος αναφοράς του υπερυψωμένου πλαισίου  $z_{ref} = z_g + h/2$ , όταν σχεδόν όλες οι προηγούμενες μελέτες και ο Αμερικανικός κώδικας σχεδιασμού [22], προτείνουν ότι το ύψος αναφοράς είναι  $z_{ref} = z_g + h$ . Ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21] τέλος, παρέχει αυτή την τιμή του συντελεστή δύναμης δίχως να προχωρά σε περαιτέρω ανάλυση για παράγοντες που πιθανότατα επηρεάζουν μια τέτοια κατασκευή όπως η αναλογία πλάτους – ύψους, η αναλογία απόστασης από το έδαφος και το πορώδες του κατακόρυφου υπερυψωμένου πλαισίου.

Ο Ευρωκώδικας δεν περιέχει αναφορές σχετικά με την προέλευση των προτεινόμενων τιμών συντελεστών που παρέχει.



### 1.3.2 Αμερικάνικος κώδικας σχεδιασμού κατασκευών

Ο Αμερικάνικος κώδικας σχεδιασμού [22] παρέχει ένα σύνολο διαφορετικών τιμών αναλογιών πλάτους – ύψους, για την περίπτωση των αδιαπέραστων πλαισίων στο έδαφος, και για κάθε μια από τις τιμές αυτές παρέχεται ο μέσος συντελεστής δύναμης για τη συνολική επιφάνεια του πλαισίου. Για τιμές αναλογίας πλάτους – ύψους  $l/h > 2$ , το πλαίσιο διαχωρίζεται σε τμήματα (διαφορετικού μήκους από το διαχωρισμό που κάνει ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21]) και ο μέσος συντελεστής δύναμης παρέχεται για κάθε τμήμα. Να σημειωθεί πως ταυτόχρονα υπάρχει και η τιμή του συντελεστή δύναμης για όλη την επιφάνεια του πλαισίου για αναλογίες πλάτους – ύψους  $l/h > 2$ .

Για τιμές πορώδους έως και 30%, τα κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος πρέπει, βάσει του Αμερικάνικου κώδικα [22], να θεωρούνται είτε αδιαπέραστα είτε ο μέσος συντελεστής του πλαισίου μπορεί να υπολογιστεί από τις αντίστοιχες τιμές των αδιαπέραστων πλαισίων, αφού πολλαπλασιασθούν με ένα συντελεστή μείωσης (Εξίσωση 5):

$$c_{f-porous} = (1 - p^{1.5})c_{f-solid} \quad (5)$$

Για τιμή πορώδους μεγαλύτερη του 30% ο Αμερικάνικος κώδικας [22] ακολουθεί μια ιδιαίτερα αυθαίρετη διαδικασία. Παρέχονται τρία διαστήματα τιμών πορώδους ( $30\% \leq p \leq 70\%$ ,  $71\% \leq p \leq 90\%$  και  $p > 90\%$ ) και τρεις αντίστοιχες τιμές συντελεστή δύναμης  $c_f'$  (1.6, 1.8, 2.0) για κάθε ένα από τα αντίστοιχα διαστήματα. Ο συντελεστής δύναμης  $c_f'$  μοιάζει να είναι ο συντελεστής δύναμης του αντίστοιχου αδιαπέραστου πλαισίου, πράγμα που όμως δεν διευκρινίζεται. Επίσης εδώ δεν υπάρχει διαχωρισμός βάσει αναλογίας πλάτους – ύψους, οπότε παρουσιάζεται ένας συντελεστής για κατακόρυφα πλαίσια με οποιαδήποτε γεωμετρικά χαρακτηριστικά, το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί κατά κάποιο τρόπο ως αυθαιρεσία. Ο συντελεστής δύναμης του πλαισίου με πορώδες  $p$  υπολογίζεται από την Εξίσωση 6:

$$c_f = (1 - p)c_f' \quad (6)$$

Ο Αμερικάνικος κώδικας [22] δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη εξήγηση για το πώς προήλθαν οι προτεινόμενες τιμές του  $c_f'$  για κάθε διάστημα τιμών πορώδους, παρότι ο κώδικας αυτός παρέχει αναφορά για όλες τις περιπτώσεις κατασκευών και όλες τις προτεινόμενες τιμές συντελεστών του (κάτι που ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21] δεν κάνει σε καμιά περίπτωση). Σύμφωνα με μια γρήγορη εξήγηση που παρατίθεται, οι συντελεστές δύναμης αυτοί υπολογίστηκαν από πειράματα σε ανεμοσήραγγα μα κάτω από συνθήκες ομοιόμορφης ροής και μικρής έντασης της τύρβης. Η αξιοπιστία τους πρέπει να επαληθευθεί και για τυρβώδεις ροές, όπως αναφέρει ο Αμερικάνικος κώδικας [22].

Για τις τιμές μέσου συντελεστή δύναμης που παρέχει ο Αμερικάνικος κώδικας [22] για όλη την επιφάνεια του πλαισίου, λαμβάνει υπόψη διεύθυνση ανέμου ίση με 0° γιατί είναι η πιο κρίσιμη στην περίπτωση αυτή. Για τις τιμές που παρέχει όταν το πλαίσιο διαχωρίζεται σε τμήματα, λαμβάνεται υπόψη η διεύθυνση ανέμου πλησίον των 45°. Όπως είδαμε και στη διεθνή βιβλιογραφία για τέτοιες διευθύνσεις ανέμου η μέση τιμή του συντελεστή δύναμης στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου γίνεται μέγιστη.

Η προσαρμογή γωνιών στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου έχει ληφθεί υπόψη. Για διαφορετικά μήκη γωνιών, προτείνονται κάποιοι συντελεστές μείωσης του συντελεστή

δύναμης για τα άκρα του πλαισίου συγκριτικά με την περίπτωση που τα άκρα είναι ελεύθερα. Για τιμές μήκους των προσαρμοσμένων γωνιών που δεν παρουσιάζονται μέσα στον Αμερικάνικο κώδικα [22], επιτρέπεται γραμμική παρεμβολή.

Για υπερυψωμένα πλαίσια, μεταβολή των παραμέτρων όπως η αναλογία πλάτους – ύψους, το πορώδες αλλά και διεύθυνση του ανέμου παρουσιάζονται από τον Αμερικάνικο κώδικα [22] να μεταβάλλουν το συντελεστή δύναμης σχεδόν όμοια με την περίπτωση των πλαισίων στο έδαφος. Για ένα αριθμό τιμών αναλογίας απόστασης από το έδαφος, σε συνδυασμό με την αναλογία πλάτους – ύψους, παρέχονται τιμές του μέσου συντελεστή δύναμης είτε για τη συνολική επιφάνεια του πλαισίου, είτε για τα τμήματα στα οποία, όπως προαναφέρθηκε, ο Αμερικάνικος κώδικας διαχωρίζει το πλαίσιο για  $l/h > 2$ .

Ο Αμερικάνικος κώδικας σχεδιασμού [22] ορίζει ως ύψος αναφοράς, για τον υπολογισμό της δυναμικής πίεσης, την τιμή  $z_{ref} = z_g + h$  για όλες τις περιπτώσεις κατακόρυφων πλαισίων.

### **1.3.3 Σύγκριση Ευρωπαϊκού και Αμερικάνικου κώδικα σχεδιασμού κατασκευών.**

Είναι προφανές ότι υπάρχει πρόσβαση σε πληθώρα αποτελεσμάτων διαφορετικών τύπων κατακόρυφων πλαισίων μέσω των προηγούμενων ερευνητικών μελετών. Επίσης οι κώδικες σχεδιασμού κατασκευών παρέχουν τιμές παραμέτρων που θα καθορίζουν το βέλτιστο σχεδιασμό μιας τέτοιας κατασκευής για συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τιμές πορώδους. Η ερώτηση που αιωρείται αφορά την αξιοπιστία των παρουσιασθέντων αποτελεσμάτων όπως και των προτεινόμενων τιμών παραμέτρων σχεδιασμού από τους κώδικες.

Οι προηγούμενες ερευνητικές μελέτες, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο με τη βοήθεια εκτεταμένων συγκρίσεων, βασίστηκαν στον υπολογισμό του συντελεστή δύναμης  $c_f$ . Όλες αυτές οι ερευνητικές μελέτες χρησιμοποίησαν σε γενικές γραμμές μια συγκεκριμένη διαδικασία υπολογισμού μέσω συντελεστών δύναμης. Η διαδικασία αυτή είναι να μετρηθεί η μέση τιμή της δύναμης πάνω στην επιφάνεια του πλαισίου και να υπολογιστεί η δυναμική πίεση από μετρήσεις ταχύτητας ανέμου οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε μια προσήνεμη θέση μακριά από την κατασκευή, ώστε η ταχύτητα να διατηρείται ανεπηρέαστη, και σε ένα συγκεκριμένο ύψος, το ύψος αναφοράς  $z_{ref}$  (Εξίσωση 3). Διαιρώντας τη μέση τιμή της δύναμης με τη δυναμική πίεση παρέχεται ο συντελεστής δύναμης. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να μετρηθεί η ταχύτητα και η δύναμη ποικίλουν. Αυτό όμως που είναι σημαντικό είναι οι μετρήσεις να είναι μέσες χρονικά τιμές και ο ορισμός ενός αυθαίρετου ύψους αναφοράς για τον υπολογισμό της δυναμικής πίεσης (στις περισσότερες ερευνητικές μελέτες το ύψος αναφοράς έχει οριστεί ως ο ύψος του πλαισίου).

Συγκρίσεις λοιπόν ανάμεσα σε προηγούμενες ερευνητικές μελέτες μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω των συντελεστών δύναμης, αρκεί να πληρούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η σύγκριση όμως μεταξύ των δυο κωδίκων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, βασιζόμενη στους συντελεστές δύναμης  $c_f$  είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα. Επίσης, η τροποποίηση των συντελεστών δύναμης ώστε να γίνουν συγκρίσιμοι είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αν όχι μη ρεαλιστική, από τη στιγμή που οι δυο αυτοί κώδικες παρουσιάζονται να έχουν πολλές διαφορές. Οι σημαντικότερες παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ο Ευρωκώδικας [21] χρησιμοποιεί το λογαριθμικό προφίλ ταχυτήτων ανέμου ενώ ο Αμερικάνικος κώδικας [22] το εκθετικό.
- Ο Ευρωκώδικας [21] διαιρεί την τραχύτητα του εδάφους σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες παρέχοντας αντίστοιχα πέντε παραμέτρους τραχύτητας εδάφους  $z_o$  (terrain roughness factor) όταν ο Αμερικάνικος κώδικας [22] υποθέτει τρεις κατηγορίες δίνοντας τρεις αντίστοιχες παραμέτρους τραχύτητας εδάφους  $a$ .
- Η βασική ταχύτητα (basic velocity) ορίζεται από τον Ευρωκώδικα [21] ως η μέση τιμή της σε χρονική διάρκεια δέκα λεπτών (10 minutes average velocity) στα δέκα μέτρα ύψος από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ ο Αμερικάνικος κώδικας [22] ορίζει τη βασική ταχύτητα ως την μέση τιμή της στα τρία δευτερόλεπτα (3-second gust velocity) στο ίδιο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους.
- Για τα υπερυψωμένα πλαίσια ο Ευρωκώδικας [21] ορίζει το ύψος αναφοράς  $z_{ref}$  στο μισό του ύψους του πλαισίου ενώ ο Αμερικάνικος κώδικας [22] στην κορυφή του πλαισίου.

Ανάλογα, δυο διαφορετικές διαδικασίες υιοθετούνται από τον Ευρωκώδικα [21] και τον Αμερικάνικο κώδικα [22] για τον υπολογισμό των δυνάμεων σχεδιασμού σε κατακόρυφα πλαίσια. Οι συντελεστές δύναμης, όπως παρέχονται από τον κάθε κώδικα, είναι προσαρμοσμένοι ώστε μέσω της αντίστοιχης διαδικασίας να οδηγείται ο χρήστης στον υπολογισμό των κατάλληλων δυνάμεων σχεδιασμού. Οποιαδήποτε περαιτέρω απόπειρα τροποποίησης των συντελεστών δύναμης που οι δυο κώδικες παρέχουν, σε μια προσπάθεια να γίνουν συγκρίσιμοι, είναι μη ρεαλιστική και οδηγεί σε ανακριβή συμπεράσματα αν ληφθούν υπόψη οι διαφορές που προαναφέρθηκαν. Αν σε όλα αυτά συμπεριληφθεί το γεγονός πως ο Ευρωκώδικας [21] δεν κάνει αναφορές σε σχετικές ερευνητικές μελέτες, όσο αφορά την προέλευση των προτεινόμενων τιμών του, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα πως η σύγκριση των δυο κωδίκων για την ανάδειξη των όποιων διαφορών έχουν θα επιτευχθεί μόνο μέσω του υπολογισμού των δυνάμεων σχεδιασμού.

**Πίνακας 1.** Σύγκριση ισοδύναμων συντελεστών δύναμης  $c_f$  για τη συνολική επιφάνεια αδιαπέραστου πλαισίου στο έδαφος ανάμεσα στον Ευρωκώδικα [21] και τον Αμερικάνικου κώδικα [22].

	<i>l/h (Αναλογία πλάτους-ύψους)</i>							
	<i>1 (l/h=5/5)</i>		<i>2 (l/h=10/5)</i>		<i>5 (l/h=35/7)</i>		<i>10 (l/h=50/5)</i>	
	<i>Eurocode</i>	<i>ASCE/SEI</i>	<i>Eurocode</i>	<i>ASCE/SEI</i>	<i>Eurocode</i>	<i>ASCE/SEI</i>	<i>Eurocode</i>	<i>ASCE/SEI</i>
$c_f$	1.67*	1.45	1.54*	1.40	1.42*	1.38	1.52*	1.30
<i>Δύναμη Σχεδιασμού (kN)</i>	20.14	12.00	37.00	23.00	206.90	113.30	183.00	102.00

(\*) *Ισοδύναμοι συντελεστές δύναμης  $c_f$  όπως υπολογίστηκαν για τη συνολική επιφάνεια του πλαισίου.*

Ως απόδειξη όσων συζητήθηκαν παραπάνω, ας υποτεθεί για επεξηγηματικούς λόγους, ότι οι προτεινόμενες τιμές συντελεστών δύναμης των δυο κωδίκων είναι συγκρίσιμες. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει συντελεστές δύναμης και τις αντίστοιχες υπολογισμένες δυνάμεις σχεδιασμού για τέσσερα πλαίσια με συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Οι ισοδύναμοι συντελεστές δύναμης υπολογίστηκαν ως εξής:

Για κάθε τμήμα που ο Ευρωκώδικας διαχωρίζει ένα κατακόρυφο πλαίσιο και παρέχει μια τιμή συντελεστή πίεσης, υπολογίζεται η αντίστοιχη δύναμη σχεδιασμού. Η συνισταμένη δύναμη που ασκείται σε όλη την επιφάνεια του πλαισίου προκύπτει απλά από την άθροιση όλων των επιμέρους δυνάμεων. Τελικά, διαιρώντας τη συνισταμένη δύναμη με τη συνολική επιφάνεια προκύπτει μια ισοδύναμη τιμή συντελεστή πίεσης για το πλαίσιο συνολικά. Οι συντελεστές πίεσης (που είναι ίσοι με τους συντελεστές δύναμης) που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Για τον Αμερικάνικο Κώδικα [22] δεν πραγματοποιήθηκε κάποιος ιδιαίτερος υπολογισμός από τη στιγμή που παρέχονται τιμές συντελεστή δύναμης για την συνολική επιφάνεια του πλαισίου.

Να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 εξήχθησαν για αδιαπέραστα πλαίσια τοποθετημένα στο έδαφος. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων σχεδιασμού υποτέθηκε ότι η τραχύτητα του εδάφους αντιστοιχεί σε περιοχή με χαμηλή βλάστηση και εμπόδια τα οποία απέχουν σημαντικές αποστάσεις μεταξύ τους. Για τον συγκεκριμένο τύπο τραχύτητας εδάφους και οι δυο κώδικες κατασκευής [21,22] έχουν αντίστοιχη κατηγορία και τα αποτελέσματα αναμένονται να είναι συγκρίσιμα.

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1, για αναλογία πλάτους-ύψους ίση με 1 και 10 οι συντελεστές δύναμης έχουν τις μεγαλύτερες διαφορές, με τον Ευρωκώδικα [21] να δίνει τιμές 15% και 17% μεγαλύτερες από τον Αμερικάνικο κώδικα [22]. Παρά τη σχετικά μικρή διαφορά στους συντελεστές δύναμης, η δύναμη σχεδιασμού στην περίπτωση όπου  $l/h=1$  είναι υψηλότερη κατά 68% και κατά 79% για την περίπτωση όπου  $l/h=10$ , συγκριτικά με τις προτεινόμενες τιμές του Αμερικάνικου κώδικα [22]. Για αναλογία πλάτους-ύψους  $l/h=5$ , οι συντελεστές δύναμης  $c_f$  φαίνεται να βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία (μόλις 2.5% διαφορά) μεταξύ τους. Παρά τη συμφωνία αυτή, οι δυνάμεις σχεδιασμού εμφανίζουν και πάλι έντονες διαφορές, με τον Ευρωκώδικα να παρέχει τιμές κατά ένα ποσοστό 83% μεγαλύτερες. Οι διαφορές αυτές στις υπολογιζόμενες δυνάμεις σχεδιασμού των δυο κωδίκων, μπορεί να αποδοθεί εν μέρει στις διαφορές των προτεινόμενων ή ισοδύναμων συντελεστών δύναμης (ενός ποσοστού μεταξύ 3% έως 17%) αλλά κυρίως, στις συστηματικές διαφορές που προκύπτουν από την διαφορετική προσέγγιση της διαδικασίας με την οποία δυο οι κώδικες παρέχουν δυνάμεις σχεδιασμού. Οι συστηματικές αυτές διαφορές δεν επιτρέπουν τη σύγκριση των δυο κωδίκων όταν αυτή γίνεται βασισμένη στους συντελεστές δύναμης. Οι ανωτέρω συγκρίσεις αποδεικνύουν ότι οι συντελεστές δύναμης που οι δυο κώδικες προτείνουν για τα κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα αλλά ούτε και να τροποποιηθούν ώστε να εξαχθούν ισοδύναμες και συγκρίσιμες τιμές  $c_f$  για να είναι εφικτή και μια τέτοια σύγκριση των δυο κωδίκων. Από την άλλη, ο υπολογισμός των δυνάμεων σχεδιασμού παρουσιάζει την ασυμφωνία των δυο κωδίκων καθιστώντας τις προτεινόμενες οδηγίες σχεδιασμού του Ευρωκώδικα [21] πιο συντηρητικές, είτε πιο ασφαλείς.

Παρεμφερή αποτελέσματα παρουσιάζονται και στον Πίνακα 2, όπου οι συντελεστές δύναμης και οι δυνάμεις σχεδιασμού υπολογίστηκαν για ένα περατό πλαίσιο, με 20% τιμή πορώδους, για τις ίδιες περιπτώσεις τιμών αναλογίας πλάτους-ύψους όπως και στον Πίνακα 1.

Παρόλο που για το περατό πλαίσιο στο έδαφος οι συντελεστές δύναμης που παρέχονται από τους δυο κατασκευαστικούς κώδικες δείχνουν να βρίσκονται σε συμφωνία (διαφέρουν από 1.7% έως και 9.0%), οι δυνάμεις σχεδιασμού εμφανίζουν υψηλές διαφορές (μεταξύ 38% και 56%). Για όλες τις περιπτώσεις αναλογιών πλάτους-ύψους ο Ευρωκώδικας αποδίδει μια τιμή της δύναμης του ανέμου η οποία είναι κατά προσέγγιση 1.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή που παρέχει ο Αμερικάνικος κώδικας [22].

**Πίνακας 2.** Σύγκριση ισοδύναμων συντελεστών δύναμης  $c_f$  για τη συνολική επιφάνεια περατού πλαισίου (20% πορώδες) στο έδαφος ανάμεσα στον Ευρωκώδικα [21] και τον Αμερικάνικου κώδικα [22].

	<i>l/h (Αναλογία πλάτους-ύψους)</i>							
	<i>1 (l/h=5/5)</i>		<i>2 (l/h=10/5)</i>		<i>5 (l/h=35/7)</i>		<i>10 (l/h=50/5)</i>	
	<i>Eurocode</i>	<i>ASCE/SEI</i>	<i>Eurocode</i>	<i>ASCE/SEI</i>	<i>Eurocode</i>	<i>ASCE/SEI</i>	<i>Eurocode</i>	<i>ASCE/SEI</i>
$c_f$	1.20*	1.32	1.20*	1.27	1.20*	1.23	1.20*	1.18
<i>Δύναμη Σχεδιασμού (kN)</i>	14.50	10.60	28.90	21.00	156.60	103.20	144.70	92.90

\* Ο Ευρωκώδικας [21] παρέχει μία μόνο τιμή συντελεστή δύναμης  $c_f$  για τη συνολική επιφάνεια ενός πλαισίου συγκεκριμένης τιμής πορώδους.

Ο συντηρητισμός (ή ασφάλεια) του Ευρωκώδικα [21] συγκριτικά με τον Αμερικάνικο κώδικα [22] μπορεί να αποδοθεί στο διαφορετικό τρόπο με τον οποίο ο κάθε κώδικας εκτιμά την επίδραση των ριπών ανέμου (gust effects). Για τον Ευρωκώδικα, ο οποίος παρέχει μέσες τιμές ταχυτήτων (μέση τιμή ταχύτητας στα δέκα λεπτά) ένας επιπρόσθετος συντελεστής ριπών (gust factor) ορίζεται. Ο συντελεστής αυτός είναι ένας πολλαπλασιαστής περίπου ίσος με 3.5. Για τον Αμερικάνικο κώδικα ο οποίος παρέχει μέση τιμή ταχύτητας των τριών δευτερολέπτων, ορίζεται ένας συντελεστής ριπών ίσος με 0.85, από τη στιγμή που η επίδραση των ριπών ανέμου συνυπολογίζονται από την ίδια την τιμή της προτεινόμενης βασικής ταχύτητας. Συσχετισμός των βασικών ταχυτήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια της καμπύλης του *Durst (Durst curve)* [45]. Μέσω της καμπύλης αυτής υπολογίζεται ότι οι βασικές ταχύτητες των δυο κωδίκων (Αμερικάνικος κώδικας / Ευρωκώδικας) έχουν λόγο ίσο με 1.42. Ο λόγος αυτός είναι ίσος με ένα πολλαπλασιαστή 2 όταν υψώνεται στο τετράγωνο (οι ταχύτητες υψώνονται στο τετράγωνο ώστε να υπολογιστεί η δυναμική πίεση κατά τη διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων σχεδιασμού). Αυτό σημαίνει ότι ο Αμερικάνικος κώδικας [22] έχει ένα συνολικό πολλαπλασιαστικό παράγοντα για την επίδραση των ριπών του ανέμου ίσο με  $2 \cdot 0.85 = 1.7$ , όταν ο Ευρωκώδικας [21], όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζει ένα αντίστοιχο συντελεστή ίσο με 3.5. Τελικό συμπέρασμα είναι ότι ο Ευρωκώδικας [21] προτείνει διπλάσια επίδραση των ριπών ανέμου συγκριτικά με τον Αμερικάνικο κώδικα [22] και αυτό φαίνεται να είναι ο κύριος λόγος των αποκλίσεων των δυνάμεων σχεδιασμού στους Πίνακες 4 & 5.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 δίνουν τους συντελεστές δύναμης (που και πάλι υποτίθεται ότι είναι συγκρίσιμοι) και τις δυνάμεις σχεδιασμού για υπερυψωμένο πλαίσιο με δύο διαφορετικές τιμές αναλογίας απόστασης από το έδαφος  $h/(z_g+h)$ , 0.7 και 0.5. Για αναλογία απόστασης από το έδαφος ίση με 0.7 οι συντελεστές δύναμης δεν συμφωνούν μεταξύ τους. Ο Ευρωκώδικας [21] παρουσιάζει μοναδική τιμή ίση με 1.8, η οποία είναι υψηλότερη από τις αντίστοιχες προτεινόμενες τιμές του Αμερικάνικου κώδικα [22] (μεταξύ 12.5% και 22%). Η υψηλότερη διαφορά 22% εμφανίζεται για την περίπτωση αναλογίας πλάτους-ύψους ίση με 10. Οι διαφορές όμως στις δυνάμεις σχεδιασμού υπολογίζονται να είναι πολύ υψηλότερες, μεταξύ 52% και 74%. Στην περίπτωση όπου  $l/h=10$  η διαφορά είναι ίση με 74%.

Για  $h/(z_g+h)=0.5$ , οι συντελεστές δύναμης συμφωνούν πολύ καλά μεταξύ τους με τον Ευρωκώδικα [21] να παρέχει ελαφρώς υψηλότερες τιμές (περίπου 6%). Αντίθετα, οι τιμές των δυνάμεων σχεδιασμού αποδεικνύουν κι εδώ ότι μια σύγκριση των δυο κωδίκων βασισμένη στους προτεινόμενους συντελεστές δύναμης είναι μη ρεαλιστική. Ο Ευρωκώδικας [21] παρέχει υψηλότερες και πάλι τιμές από αυτές που

υπολογίζονται με βάση τα όσα προτείνει ο Αμερικάνικος κώδικας [22] (οι διαφορές εδώ κυμάνθηκαν μεταξύ 46% και 58%).

**Πίνακας 3.** Σύγκριση ισοδύναμων συντελεστών δύναμης  $c_f$  για τη συνολική επιφάνεια υπερυψωμένου πλαισίου ανάμεσα στον Ευρωκώδικα [21] και τον Αμερικάνικου κώδικα [22].

Αναλογία απόστασης από το έδαφος $h/(z_g+h)$	Αναλογία πλάτους-ύψους ( $l/h$ )							
	1 ( $l/h=5/5$ )		2 ( $l/h=10/5$ )		5 ( $l/h=35/7$ )		10 ( $l/h=50/5$ )	
	Eurocode	ASCE/SEI	Eurocode	ASCE/SEI	Eurocode	ASCE/SEI	Eurocode	ASCE/SEI
$c_f$	1.80	1.60	1.80	1.55	1.80	1.50	1.80	1.48
<b>0.7</b> Δύναμη Σχεδιασμού (kN)	21.23	13.91	42.46	26.71	229.91	136.02	212.23	122.02
$c_f$	1.80	1.75	1.80	1.70	1.80	1.70	1.80	1.70
<b>0.5</b> Δύναμη Σχεδιασμού (kN)	24.44	16.75	48.88	32.30	262.77	165.67	244.41	155.42

Για τα υπερυψωμένα πλαίσια, ο συντηρητισμός (ή η ασφάλεια) του Ευρωκώδικα [21] προκύπτει κι από ένα επιπρόσθετο παράγοντα, εκτός του τρόπου που ο κάθε κώδικας αντιμετωπίζει την επίδραση των ριπών ανέμου κατά τον υπολογισμό δυνάμεων σχεδιασμού. Αυτός ο παράγοντας είναι το ύψος αναφοράς το οποίο ο Ευρωκώδικας [21] ορίζει στο μισό του ύψους του υπερυψωμένου πλαισίου, όταν ο Αμερικάνικος κώδικας το ορίζει ως το συνολικό ύψος του.

Εκτός της μεταξύ τους σύγκρισης, κάθε ένας από τους δυο αυτούς κώδικες ξεχωριστά παρουσιάζει ελλείψεις. Ο Αμερικάνικος κώδικας παρουσιάζει μια πιο λεπτομερή ανάλυση των φορτίων ανέμου πάνω στα κατακόρυφα πλαίσια από ότι ο Ευρωπαϊκός [21]. Λαμβάνονται υπόψη όλες οι βασικές παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν τα φορτία ανέμου και παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές δύναμης, ενώ συμπεριλαμβάνεται η εξέταση πολλών διαφορετικών περιπτώσεων (όπως διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρικών χαρακτηριστικών). Για τα περατά κατακόρυφα πλαίσια όμως, οι προτεινόμενες τιμές του μέσου συντελεστή δύναμης και κυρίως για τιμή πορώδους  $p \geq 30\%$ , είναι υπό αμφισβήτηση. Αυτό οφείλεται στην αυθαίρετη διαδικασία που ο Αμερικανικός κώδικας [22] ακολουθεί ώστε να παρουσιάσει τη μείωση των μέσων συντελεστών δύναμης ανάλογα με την τιμή του πορώδους.

Στον αντίποδα, ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21] δεν είναι τόσο απλός στη χρήση. Η αναλογία πλάτους – ύψους είναι η μόνη παράμετρος που εξετάζει ικανοποιητικά. Αυτό όμως ισχύει μόνο στην περίπτωση ενός πλαισίου στο έδαφος, αλλά ακόμη κι εδώ ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21] παρέχει τους συντελεστές δύναμης με ένα ιδιαίτερα περίπλοκο τρόπο. Η περίπτωση των υπερυψωμένων πλαισίων καλύπτεται από τον Ευρωπαϊκό κώδικα [21] με μία μόνο τιμή μέσου συντελεστή δύναμης ( $c_f=1.8$ ) χωρίς καμιά περαιτέρω ανάλυση των βασικών παραμέτρων που μπορούν να επηρεάσουν τα φορτία ανέμου στην κατασκευή.

Σημαντικές ασυνέπειες εμφανίζονται για τον Ευρωπαϊκό κώδικα [21] και στην περίπτωση των περατών πλαισίων. Ειδικότερα για την περίπτωση όπου ένα πλαίσιο έχει τιμή πορώδους μεγαλύτερη του 20%, προτείνεται πως οι κατασκευές αυτές θα

πρέπει να αντιμετωπίζονται ως δικτυώματα ή σκαλωσιές. Ακολουθώντας όμως, την προσέγγιση αυτή, ο συντελεστής δύναμης για το σχεδιασμό κατακόρυφων πλαισίων που χρησιμοποιούν ως περατό υλικό γεωργικά δίχτυα, όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στα πλήρους κλίμακας πειράματα που θα αναλυθούν στη συνέχεια, αποκτά τη μη ρεαλιστική και συντηρητική τιμή του  $c_f=1.6$ . Αυτή η τιμή ισχύει για περιπτώσεις όπου το περατό υλικό αποτελείται από μη κυκλικής διατομής στοιχεία. Για κυκλικής διατομής στοιχεία, ο μέσος συντελεστής δύναμης που προτείνει ο Ευρωπαϊκός κώδικας [21], είναι ίσος με  $c_f=1.1$ . Η τιμή αυτή όμως είναι πολύ κοντά στην τιμή που δίνει για αδιαπέραστα πλαίσια  $c_f=1.2$ . Οι ασυνέπειες αυτές αποδεικνύουν ότι η προσέγγιση των περατών πλαισίων ως επίπεδα δικτυώματα από τον Ευρωπαϊκό κώδικα [21], δεν αποτελεί αξιόπιστη λύση για εκτίμηση των μέσων συντελεστών δύναμης σχεδιασμού για περατά κατακόρυφα πλαίσια, που χρησιμοποιούν περατό υλικό με μορφή πλέγματος (όπως τα γεωργικά δίχτυα) με τιμή πορώδους μεγαλύτερη του 20%.

#### ***1.4 Ερευνητικές μελέτες στη Διεθνή Βιβλιογραφία***

Η απλότητα και η ευκολία στην κατασκευή ενός κατακόρυφου πλαισίου ήταν ο βασικός λόγος για τον οποίο αρκετές ερευνητικές μελέτες ασχολήθηκαν με αυτού του είδους τις κατασκευές. Πολλές μελέτες υπάρχουν διαθέσιμες στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τα κατακόρυφα πλαίσια [1-20, 23, 24, 27, 28]. Η πλειονότητα των μελετών αυτών είναι μελέτες πάνω σε πειράματα που λάβανε χώρα σε ανεμοσήραγγες (wind tunnel studies). Πλήρους κλίμακας πειράματα έχουν επίσης γίνει αλλά ο χρόνος και το υψηλό κόστος που απαιτείται για την ολοκλήρωσή τους δεν οδήγησε τους περισσότερους ερευνητές σε αυτού του είδους τα πειράματα. Δημοσιευμένα αποτελέσματα από μελέτες πάνω σε πειράματα και των δυο προαναφερθέντων ειδών έχουν ενσωματωθεί σε κατασκευαστικούς κώδικες. Η εξέλιξη των αριθμητικών προσομοιώσεων και η πρόοδος που πραγματοποιήθηκε στον τομέα αυτό, οδήγησε αρκετούς ερευνητές στη μελέτη των φορτίων ανέμου πάνω σε διάφορες κατασκευές, όπως και στα κατακόρυφα πλαίσια, με τη βοήθεια των υπολογιστικών προσομοιώσεων. Οι μελέτες και τα αποτελέσματα που βασίζονται σε αριθμητικές προσομοιώσεις, παρά την σημαντική εξέλιξή τους τα τελευταία χρόνια, δεν μπορούν να θεωρηθούν ακόμη τόσο αξιόπιστα όσο τα αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν από ένα πλήρους κλίμακας πείραμα είτε από ένα πείραμα σε ανεμοσήραγγα. Για το λόγο αυτό, όπως θα γίνει εμφανές στη συνέχεια, μικρός είναι ο αριθμός τέτοιου είδους μελετών που υπάρχουν για κατακόρυφα πλαίσια.

##### ***1.4.1 Φορτία Ανέμου***

###### ***1.4.1.1 Αδιαπέραστα κατακόρυφα πλαίσια τοποθετημένα στο έδαφος.***

Πριν τη δεκαετία του '70 τα χαρακτηριστικά του προφίλ του ανέμου δεν είχαν επαληθευτεί πλήρως ακόμη και πειράματα σε ανεμοσήραγγες δεν είχαν τη δυνατότητα να προσομοιώσουν κατάλληλα το τυρβώδες οριακό στρώμα (turbulent boundary layer). Η υπόθεση ότι η ροή του ανέμου ήταν στρωτή, έδινε αποτελέσματα τα οποία συγκρινόμενα με αποτελέσματα από πλήρους κλίμακας πειράματα παρουσίαζαν έντονες αποκλίσεις. Μετά τις αρχές της δεκαετίας του '70 το πρόβλημα αυτό έπαψε να ισχύει και το τυρβώδες οριακό στρώμα ήταν εφικτό να προσομοιωθεί κατάλληλα. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '80 ο αριθμός μελετών που γίνανε, είχαν ως στόχο να εξετάσουν την επίδραση του οριακού στρώματος της τύρβης πάνω στο συντελεστή

δύναμης  $c_f$  και συγκεκριμένα πως το πάχος  $\delta$  του οριακού στρώματος της τύρβης ( $\delta$ , το ύψος στο οποίο το οριακό στρώμα της τύρβης έχει αναπτυχθεί πλήρως και αποκτά μια σταθερή ταχύτητα) σχετιζόταν με το συντελεστή αυτό, ο οποίος εκείνη την εποχή οριζόταν ως:

$$c_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V_*^2 A_{ref}} \quad (7)$$

όπου  $V_*$  (m/s) : ταχύτητα τριβής όπως παρουσιάζεται στο λογαριθμικό προφίλ της ταχύτητας του ανέμου

$F$  (N) : το φορτίο ανέμου πάνω στο κατακόρυφο πλαίσιο

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) : η πυκνότητα του αέρα

$A_{ref}$  (m<sup>2</sup>) : επιφάνεια αναφοράς που αντιστοιχεί στην επιφάνεια του πλαισίου στην οποία προσπίπτει ο άνεμος

Οι Ranga Raju et al [3] προτείνανε σαν εναλλακτική αδιάστατη παράμετρο που θα μπορούσε να αντικαταστήσει το πάχος του οριακού στρώματος της τύρβης  $\delta$ , τον αριθμό *Jensen* ( $Je$ ), με  $Je = (z_g + h)/z_0$ , όπου  $z_0$  είναι η παράμετρος τραχύτητας του εδάφους. Ο Holmes το 1996, όπως αναφέρθηκε από τους Letchford & Holmes [5], χρησιμοποιώντας δεδομένα από προηγούμενες μελέτες των Good & Joubert [1] και των Ranga Raju et al [3] απέδειξε ότι ο συντελεστής δύναμης εάν οριστεί ως:

$$c_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V_{z_{ref}}^2 A_{ref}} \quad (8)$$

όπου  $V_{z_{ref}}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ένα ύψος αναφοράς της κατασκευής, τότε για  $Je = 40-1000$  ο συντελεστής δύναμης  $c_f$  παραμένει αμετάβλητος. Αυτός παραμένει ακόμη και σήμερα ο ορισμός του συντελεστή δύναμης.

Στη δεκαετία του '90, οι μελέτες επικεντρώθηκαν στον τρόπο με τον οποίο επιδρά η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου πάνω σε κατακόρυφα πλαίσια, στον συντελεστή δύναμης  $c_f$ . Τα αποτελέσματα που δόθηκαν από τις ερευνητικές μελέτες αυτές για τον συντελεστή δύναμης είναι μέσες χρονικά τιμές. Μέγιστες τιμές του συντελεστή δύναμης μπορούν να βρεθούν σε πολύ λίγες μελέτες. Επιπρόσθετα, υπάρχουν τρεις τύποι μελετών ανάλογα με το που (χωρικά) μελετήθηκε ο συντελεστής πίεσης. Έτσι λοιπόν μελετήθηκε η μέση τιμή στο κεντρικό τμήμα του πλαισίου, στα άκρα και στο σύνολο της επιφάνειάς του.

#### **1.4.1.1.1 Αποτελέσματα του μέσου συντελεστή δύναμης στο κεντρικό τμήμα του κατακόρυφου πλαισίου**

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει αποτελέσματα μέσω των τιμών του συντελεστή δύναμης για το κεντρικό τμήμα του κατακόρυφου πλαισίου. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται επίσης αποτελέσματα από προηγούμενες μελέτες για δυσδιάστατα κατακόρυφα πλαίσια (κατακόρυφα πλαίσια απείρου πλάτους).

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται μέσες τιμές συντελεστών δύναμης  $c_f$  από όλα τα πιθανά ήδη μελετών που μπορούν να διεξαχθούν (πλήρους κλίμακας, ανεμοσήραγγας



και αριθμητικής προσομοίωσης (CFD)) για μια περίοδο άνω των 30 ετών. Είναι εμφανές πως η τιμή του  $c_f$  για το κεντρικό τμήμα του κατακόρυφου πλαισίου, είτε για τα δυσδιάστατα κατακόρυφα πλαίσια, αποδεικνύεται ότι κυμαίνεται κάπου ανάμεσα σε 1.0 - 1.2. Αυτή η συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα των δυσδιάστατων πλαισίων και σε αυτά που προέρχονται από το κεντρικό τμήμα του κατακόρυφου πλαισίου ήταν αναμενόμενη. Στο κεντρικό τμήμα του πλαισίου δεν υπάρχει επίδραση των τυρβωδών φαινομένων που παρατηρούνται στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου. Την ίδια ιδιότητα έχουν και τα απείρου πλάτους κατακόρυφα πλαίσια όντας δυσδιάστατα, όπου δεν υπάρχουν ελεύθερα άκρα. Να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 εξήχθησαν για κάθετη πρόσπτωση ανέμου στο κατακόρυφο πλαίσιο, από τη στιγμή που αυτή είναι η χειρότερη πιθανή περίπτωση φορτίων ανέμου για το κεντρικό τμήμα του πλαισίου. Για γωνία πρόσπτωσης διαφορετική των  $0^\circ$  (κάθετη πρόσπτωση) τα φορτία στο κατακόρυφο πλαίσιο και κατ' επέκταση ο συντελεστής δύναμης μειώνεται.

**Πίνακας 4.** Μέσες τιμές συντελεστών δύναμης στο κεντρικό τμήμα του κατακόρυφου πλαισίου όπως παρουσιάστηκαν από προηγούμενες ερευνητικές μελέτες.

Ερευνητές	Έτος	Τύπος Μελέτης	Συντελεστής δύναμης $c_f$
Good & Joubert [1]	1968	Ανεμοσήραγγα	1.10
Bearman [2]	1971	Ανεμοσήραγγα	1.20
Ranga Raju et. al [3]	1976	Ανεμοσήραγγα	1.10
Jacobs [4]	1985	Πλήρους Κλίμακας	1.07
Letchford-Holmes [5]	1994	Ανεμοσήραγγα	1.15 1.27 – 1.38
Robertson – Hoxey [6]	1995	Πλήρους Κλίμακας CFD	1.39 – 1.78 1.59
Robertson et al. [9]	1997	Πλήρους Κλίμακας	1.05
Letchford-Robertson [11]	1999	Ανεμοσήραγγα	1.20
Holmes [27]	2001	Ανεμοσήραγγα	1.50

Παρόλα αυτά, κάποιες τιμές στον Πίνακα 4 δε δείχνουν να συμφωνούν με την πλειονότητα των αποτελεσμάτων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται στη μελέτη των Robertson & Hoxey [6] αλλά όπως διευκρινίζουν τα κατακόρυφα πλαίσια που μελέτησαν δεν ήταν απομονωμένα. Κτίρια υπήρχαν στην υπήνεμη πλευρά με ύψος ίδιο ή ακόμη και μεγαλύτερο των πλαισίων. Η παρουσία τους προφανώς προκάλεσε έντονες αναρροφήσεις (suctions) υπήνεμα του πλαισίου που οδήγησαν σε μεγαλύτερες συνολικές τιμές του συντελεστή δύναμης. Οι Letchford & Holmes [5] επίσης παρουσίασαν μια τιμή που αποκλίνει από το γενικό κανόνα. Αυτή η τιμή ήταν 1.38 και μαζί με την τιμή που παρουσιάζεται δίπλα της στον Πίνακα 1(1.27) ,

εξήχθησαν για περίπτωση ομοιόμορφης ροής (δεν χρησιμοποιήθηκε το λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας του ανέμου, αλλά μια σταθερή τιμή). Αυτό προκάλεσε πιο έντονα υπήνεμα φαινόμενα με αποτέλεσμα να προκληθούν πιο έντονες αναρροφήσεις και να αυξηθεί ο συνολικός συντελεστής δύναμης. Τέλος, ο Holmes [27], κατέληξε σε μια τιμή  $c_f = 1.50$ . Ο ίδιος απλώς αναφέρει πως το αποτέλεσμα αυτό είναι λίγο υψηλότερο από ότι αναμενόταν χωρίς όμως να δίνει περαιτέρω εξηγήσεις όσο αφορά στο τι μπορεί να προκάλεσε την απόκλιση το αποτελέσματός του.

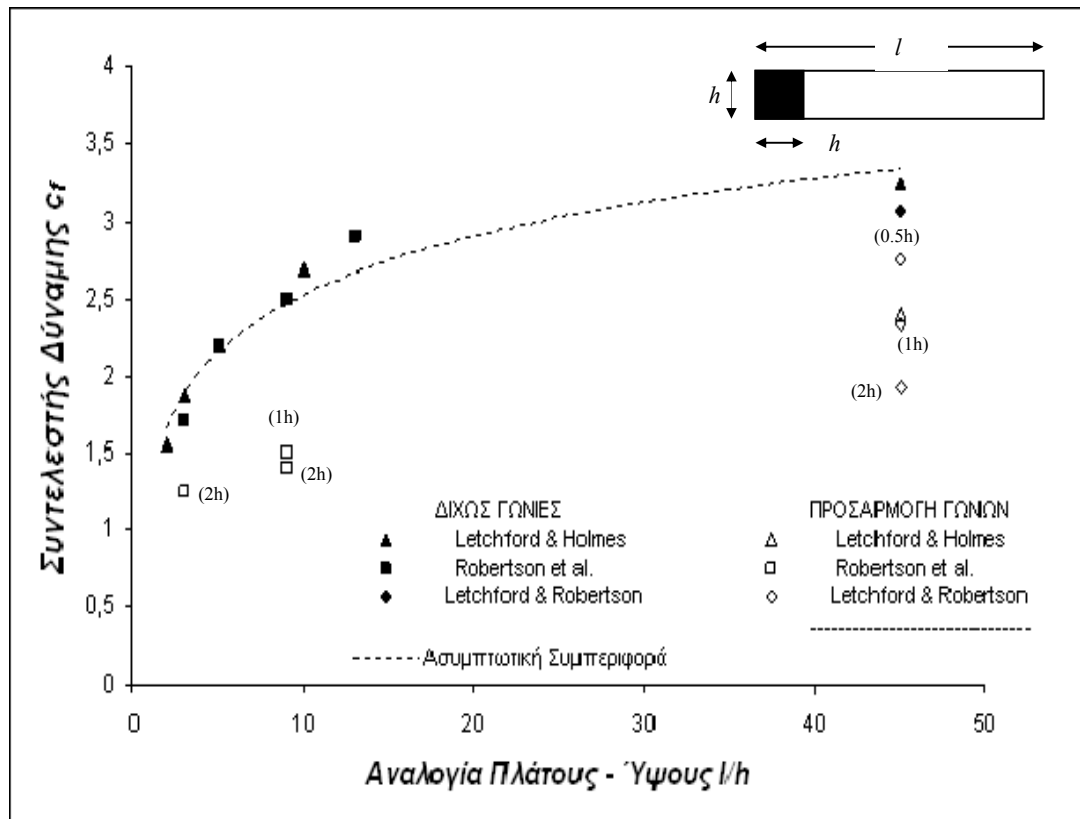
#### **1.4.1.1.2 Ο μέσος συντελεστής δύναμης στα ελεύθερα άκρα του κατακόρυφου πλαισίου**

Η έρευνα επικεντρώθηκε στο τι συμβαίνει καθώς απομακρυνόμαστε από το κεντρικό τμήμα του κατακόρυφου πλαισίου και συγκεκριμένα στα ελεύθερα άκρα του. Αλλά γιατί είναι τόσο σημαντική η μελέτη των φορτίων ανέμου στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου; Είναι γνωστό ότι η αποκόλληση της ροής προκύπτει στα σημεία αυτά. Έντονα τυρβώδη φαινόμενα εμφανίζονται στις περιοχές κοντά στα ελεύθερα άκρα και κυρίως στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου όπου έντονες αναρροφήσεις, οι οποίες προκύπτουν από το σχηματισμό στροβίλων, προκαλούν την αύξηση του μέσου συντελεστή δύναμης. Η αύξηση αυτή πολλές φορές είναι διπλάσια ή ακόμη και τριπλάσια της μέσης τιμής του συντελεστή δύναμης για το κεντρικό τμήμα του πλαισίου. Οι μέσες τιμές συντελεστών δύναμης για τα ελεύθερα άκρα εξαρτώνται από την αναλογία πλάτους – ύψους ( $l/h$ ) του πλαισίου καθώς και τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στις περιοχές αυτές του πλαισίου. Οι υψηλές τιμές φορτίων οι οποίες, όπως προαναφέρθηκε, παρατηρούνται στα ελεύθερα άκρα είναι αυτές που χρίζουν απαραίτητη την έρευνα στα τμήματα αυτά του κατακόρυφου πλαισίου με στόχο τη βέλτιστη σχεδιάσή του.

Τρεις εκτεταμένες ερευνητικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με βασικό σκοπό την αποσαφήνιση της συμπεριφοράς των ελεύθερων άκρων ενός κατακόρυφου πλαισίου όταν αυτά εκτίθενται σε φορτία ανέμου. Το 1994, οι Letchford & Holmes [5] πραγματοποίησαν μελέτες σε ανεμοσήραγγα εξετάζοντας διαφορετικές τιμές αναλογίας πλάτους – ύψους και γωνιών πρόσπτωσης του ανέμου για κατακόρυφα πλαίσια με ελεύθερα άκρα είτε με γωνίες. Το 1993 στο Silsoe (Silsoe, U.K.) της Μεγάλης Βρετανίας, μια ερευνητική ομάδα με επικεφαλής τους Robertson & Hoxey πραγματοποίησαν ένα αρκετά μακροχρόνιο πλήρους κλίμακας πείραμα το οποίο διήρκεσε περίπου 5 χρόνια. Η πρώτη τους δημοσίευση ήλθε το 1996 [7] (περισσότερες μπορούν να βρεθούν στη διεθνή βιβλιογραφία [7-10]) και τα αποτελέσματα για την κατανομή των φορτίων ανέμου στα ελεύθερα άκρα ενός κατακόρυφου πλαισίου ενσωματώθηκαν σε κώδικες κατασκευών. Οι Letchford & Robertson [11] επίσης δώσανε μια αναλυτική μελέτη σε ανεμοσήραγγα σχετικά με τα φορτία ανέμου στα ελεύθερα άκρα ενός κατακόρυφου πλαισίου.

Οι παραπάνω μελέτες δείχνανε καθαρά ότι η αύξηση της αναλογίας πλάτους – ύψους  $l/h$  δεν επηρεάζει την τιμή των φορτίων (και κατ' επέκταση του συντελεστή δύναμης) στα ελεύθερα άκρα για κάθετο προσπίπτοντα άνεμο. Για συγκεκριμένη τιμή αναλογίας πλάτους – ύψους  $l/h$  και για γωνία πρόσπτωσης που μεταβάλλεται από  $0^\circ$  προς τις  $45^\circ$ , η τιμή του συντελεστή δύναμης  $c_f$  αυξάνεται. Συγκεκριμένα παρατηρείται έντονη αύξηση για τα φορτία στα ελεύθερα άκρα για γωνία πρόσπτωσης του ανέμου ίση με  $45^\circ$ . Οι πιο κρίσιμες τιμές προκύπτουν για μεγάλες τιμές της αναλογίας πλάτους – ύψους  $l/h$  και για διεύθυνση ανέμου ίση με  $45^\circ$ . Τότε η μέση τιμή συντελεστής δύναμης αποκτά τη μέγιστη τιμή της η οποία μπορεί να είναι ακόμη και άνω του  $c_f = 3.0$ . Αποτελέσματα από μετρήσεις των παραπάνω μελετών [5, 7, 11]

έδειξαν ότι για διεύθυνση του ανέμου ίση με  $45^\circ$ , καθώς αυξάνεται η αναλογία πλάτους – ύψους οι τιμές του συντελεστή δύναμης οδηγούνται ασυμπτωτικά προς μια μέγιστη τιμή. Όπως φαίνεται από την *Εικόνα 5*, τα αποτελέσματα των μελετών που απεικονίζονται σε αυτή συμφωνούν ότι η μέγιστη αυτή τιμή είναι ανάμεσα από  $c_f = 3.0-3.5$ .



**Εικόνα 5.** Κρίσιμα φορτία στα άκρα ενός αδιαπέραστου κατακόρυφου πλαισίου για διαφορετικές τιμές αναλογίας πλάτους – ύψους ( $l/h$ ) και για ύπαρξη ή μη γωνιών στα άκρα. Αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Η *Εικόνα 5* παρουσιάζει μια σύγκριση των πιο κρίσιμων τιμών του μέσου συντελεστή πίεσης σε σχέση με την αναλογία πλάτους – ύψους  $l/h$ , όπως αναφέρθηκαν από προηγούμενες ερευνητικές μελέτες, δηλαδή για την περίπτωση της διεύθυνσης προσπίπτοντα ανέμου των  $45^\circ$ . Υπάρχει πολύ καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων όπως διαφαίνεται στο ανωτέρω διάγραμμα ανάμεσα στις μελέτες αυτές. Είναι επίσης ορατό το ότι καθώς αυξάνεται η αναλογία πλάτους – ύψους (για μια συγκεκριμένη γωνία εκτός των  $0^\circ$ , εδώ για  $45^\circ$ ) αυξάνεται και η τιμή του συντελεστή δύναμης. Όλες οι τιμές των μέσων συντελεστών δύναμης που παρουσιάζονται στην *Εικόνα 5*, προήλθαν ως μέσες τιμές μετρήσεων δύναμης που γίνανε σε τετραγωνική περιοχή κοντά στα ελεύθερα άκρα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5*, στο σχήμα της πάνω δεξιά γωνίας (περιοχή εμβαδού ίσου με  $h^2$ ). Η *Εικόνα 5* επίσης αποκαλύπτει την ασυμπτωτική συμπεριφορά (μη συνεχής γραμμή) του συντελεστή δύναμης  $c_f$  στα ελεύθερα άκρα του για διεύθυνση ανέμου ίση με  $45^\circ$ , καθώς αυξάνεται η αναλογία πλάτους – ύψους  $l/h$ .

#### 1.4.1.1.3 Ο μέσος συντελεστής δύναμης στα άκρα ενός κατακόρυφου πλαισίου με γωνίες.

Τα υψηλά φορτία που παρατηρήθηκαν στα ελεύθερα άκρα του κατακόρυφου πλαισίου ώθησαν πολλούς ερευνητές στην ανεύρεση ιδεών για τη μείωση των φορτίων αυτών. Η πιο επιτυχής ιδέα η οποία έχει μελετηθεί εκτενώς ήταν η προσαρμογή γωνιών στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου, γεγονός που δεν τα καθιστούσε πλέον ελεύθερα (Εικόνα 4). Βασικός στόχος ήταν η αποφυγή της δημιουργίας υψηλών ροπήσεων στην υπήνεμη περιοχή του κατακόρυφου πλαισίου και συγκεκριμένα κοντά στα ελεύθερα άκρα του. Η προσαρμογή γωνιών δεν επιτρέπει τη δημιουργία στροβίλων υπήνεμα του πλαισίου και οι υψηλές αναρροφήσεις παύουν να υφίστανται. Σε όλες τις προηγούμενες ερευνητικές μελέτες αποδείχθηκε πως η προσαρμογή γωνιών στα πλαίσια παρέχει σημαντική μείωση των φορτίων ανέμου αλλά διαφωνία υπάρχει όσο αφορά το βέλτιστο μήκος που οι γωνίες πρέπει να έχουν ( $L_r$ ).

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται επίσης η μείωση των πιο κρίσιμων φορτίων ανέμου στα ελεύθερα άκρα, όπως μετρήθηκαν σε προηγούμενες μελέτες, μετά την προσαρμογή γωνιών. Στις παρενθέσεις, κοντά σε κάθε τιμή του συντελεστή δύναμης  $c_f$ , δίνεται το μήκος  $L_r$  των γωνιών. Μελέτες σχετικές με τη μείωση των υψηλών φορτίων εξαιτίας της προσαρμογής γωνιών, αρχικά αποτέλεσαν μια προσπάθεια να αποσαφηνίσουν προτάσεις από τους κώδικες κατασκευής που τότε (τέλος της δεκαετίας του '90) προτείνανε ότι οι μεγαλύτερες μειώσεις στα φορτία στα άκρα παρατηρούνται εάν προσαρμοσθούν γωνίες μήκους ίσο με  $L_r=0.3h$ . Αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια καθώς και προτεινόμενες τιμές από πρόσφατους κώδικες κατασκευής αποδεικνύουν γιατί η άποψη αυτή από τότε θεωρήθηκε αβάσιμη.

Οι μειώσεις που παρατηρούνται στο ανωτέρω διάγραμμα είναι για γωνίες με διαφορετικό μήκος  $L_r$ . Για όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5, είναι εμφανής η αποδοτικότητα των γωνιών. Η μείωση των πιο κρίσιμων φορτίων εξαρτάται από την αναλογία πλάτους – ύψους  $l/h$  και το μήκος των γωνιών  $L_r$  και μπορεί να φτάσει ακόμη και το 45% όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην περίπτωση του κατακόρυφου πλαισίου με γωνίες μήκους  $L_r=2h$  (Robertson et al [9]). Δυστυχώς οι Letchford & Holmes [5] δεν αναφέρουν το μήκος των γωνιών που μελέτησαν αλλά και στην μελέτη τους παρατηρείται σημαντική μείωση (ίση με 26%) για τα πιο κρίσιμα φορτία κατά την προσαρμογή γωνιών. Οι Letchford & Robertson [11] δοκίμασαν να προσαρμόσουν γωνίες με διαφορετικά μήκη  $L_r$  και οι μετρήσεις τους δείχναν ότι η αύξηση του μήκους των γωνιών από  $0.5h$  ως την τιμή  $2h$  αντιστοιχεί σε αύξηση της μείωσης των φορτίων στα άκρα του κατακόρυφου πλαισίου. Οι Robertson et al [9] επίσης παρουσίασαν πως η αύξηση του μήκους γωνιών που προσαρμόσανε στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου που μελέτησαν, από  $L_r=1h$  σε  $L_r=2h$ , επίσης επιφέρει μεγαλύτερη μείωση των φορτίων στα ελεύθερα άκρα. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα μείωσης φορτίων ανέμου (σε ποσοστιαία μορφή) με την προσαρμογή γωνιών στα ελεύθερα άκρα κατακόρυφου πλαισίου.

Εν γένει, τα αποτελέσματα των ερευνητικών μελετών που παρουσιάστηκαν για την περίπτωση προσαρμογής γωνιών στα ελεύθερα άκρα ενός κατακόρυφου πλαισίου, παρουσίασαν ότι μια γωνία μήκους  $2h$  φαίνεται να είναι μια αξιόπιστη λύση για την σημαντική μείωση των κρίσιμων φορτίων που εμφανίζονται στα ελεύθερα άκρα. Πρέπει να τονιστεί ότι το συμπέρασμα αυτό είναι βάσιμο για κατακόρυφα πλαίσια με μεγάλη αναλογία πλάτους – ύψους που βρίσκονται στο έδαφος ( $l/h \geq 5$ ). Για μικρότερες τιμές της αναλογίας αυτής, οι τιμές των κρίσιμων φορτίων στα ελεύθερα άκρα δεν είναι τόσο υψηλές και πιθανότατα να μην είναι απαραίτητη η προσαρμογή γωνιών σε τέτοιου είδους κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος. Παρά τη διαπίστωση αυτή, στην

Εικόνα 5 αλλά και τον Πίνακα 5, ένα αποτέλεσμα προερχόμενο από τη μελέτη των Robertson et al [9] παρουσιάζει μείωση του μέσου συντελεστή δύναμης κατά 27% για ένα πλαίσιο με  $l/h=3$ , όταν προσαρμόζονται στα άκρα του γωνίες μήκους  $L_r = 2h$ .

Η επιλογή για μικρής αναλογίας πλάτους - ύψους πλαίσια συνεπώς είναι σχετική και συνδυάζει το μικρότερο κόστος (αφού η προσαρμογή γωνιών αυξάνει το κόστος) με μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας είτε το αντίστροφο. Στα μεγαλύτερης αναλογίας πλάτους - ύψους πλαίσια είναι πιθανότατα επιτακτική η επιλογή προσαρμογής γωνιών, δεδομένης της ύπαρξης πολύ υψηλών φορτίων και της έντονα υψηλής πιθανότητας αστοχίας της κατασκευής.

**Πίνακας 5.** Μείωση (%) των κρίσιμων φορτίων στα ελεύθερα άκρα ενός κατακόρυφου πλαισίου με την προσαρμογή γωνιών.

	Αναλογία πλάτους - ύψους ( $l/h$ )	Μήκος Γωνίας ( $L_r$ )	Ποσοστιαία Μείωση $c_f$
Robertson et al [7]	3	$2h$	27%
Robertson et al [9]	9	$1h$	40%
	9	$2h$	45%
Letchford & Robinson [11]	Semi-infinite	$0.5h$	10%
		$1h$	24%
		$2h$	38%
		$4h$	25%

#### 1.4.1.1.4 Ο μέσος συντελεστής δύναμης για όλη την επιφάνεια του κατακόρυφου πλαισίου

Αποτελέσματα του μέσου συντελεστή δύναμης για τη συνολική επιφάνεια του πλαισίου παρουσιάστηκαν από τους Letchford & Holmes [5] και από τον Letchford [18]. Εν γένει, οι δυο προηγούμενες ερευνητικές μελέτες δείχνανε πως για αναλογία πλάτους - ύψους  $l/h \geq 0.5$  και για διεύθυνση ανέμου στις  $0^\circ$ , ο συντελεστής δύναμης κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές  $c_f = 1.05-1.20$ . Για διεύθυνση ανέμου διαφορετική της κάθετης δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Για την ακραία περίπτωση όπου ένα κατακόρυφο πλαίσιο έχει τιμή αναλογίας πλάτους - ύψους  $l/h \leq 0.3$ , δηλαδή όταν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου το καθιστούν υψηλό και στενό, η αποκόλληση της ροής για τα ελεύθερα άκρα του πραγματοποιείται σε πολύ κοντινά σημεία με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάμιξη των δυο επιμέρους στροβίλων. Αυτό επιβαρύνει το πλαίσιο με επιπρόσθετα φορτία μιας και η ρόφηση στην υπήνεμη πλευρά του πλαισίου, όπως είναι αντιληπτό, γίνεται εντονότερη. Η μόνη μελέτη που έχει εξετάσει πλαίσια μικρής αναλογίας πλάτους - ύψους παρουσιάστηκε από το Letchford [18]. Για ένα πλαίσιο με  $l/h=0.2$  παρουσίασε πως ο μέσος συντελεστής δύναμης είναι  $c_f=1.42$ .

#### 1.4.1.1.5 Μέγιστες τιμές συντελεστή δύναμης

Μέγιστες τιμές του συντελεστή δύναμης μελετήθηκαν μόνο σε μη περατά κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος. Ακόμη και για την περίπτωση αυτή όμως, είναι ελάχιστες οι μελέτες που ασχολήθηκαν και παρουσίασαν μέγιστες τιμές συντελεστή

δύναμης. Οι Letchford & Holmes [5] πραγματοποίησαν μια μελέτη όπου μετρήσανε σε ανεμοσήραγα μέγιστες τιμές του συντελεστή δύναμης για κατακόρυφα πλαίσια με διαφορετικές αναλογίες πλάτους – ύψους αλλά και για διαφορετικές διευθύνσεις προσπίπτοντος ανέμου. Για αναλογίες πλάτους – ύψους από 0.5 ως 5 και κάθετη διεύθυνση ανέμου οι μετρήσεις τους δείχνανε μια μείωση από 3.7 ως 2.8 (οι τιμές έχουν παρθεί από διάγραμμα της συγκεκριμένης δημοσίευσης και είναι προσεγγιστικές). Η μείωση αυτή αποδόθηκε στη συσχέτιση των φορτίων (wind loads correlation) και σε αεροδυναμικής φύσης φαινόμενα. Για την ίδια αύξηση της τιμής αναλογίας πλάτους – ύψους (διάφορες περιπτώσεις από 0.5 ως 5) αλλά για διεύθυνση ανέμου ίση με  $45^\circ$ , αποτέλεσμα ήταν η αύξηση του συντελεστή δύναμης. Οι τιμές του συντελεστή δύναμης στη συγκεκριμένη περίπτωση κυμάνθηκαν από 2.8 για  $l/h=0.5$  μέχρι την τιμή  $c_f=3.2$  όταν  $l/h=5$ . Οι Letchford & Holmes [5] ανέφεραν ότι τα αυξημένα φορτία στην υπήνεμη πλευρά των ελεύθερων άκρων δημιούργησαν την αύξηση αυτή του  $c_f$ .

Μετρήσανε επίσης μέγιστες τιμές συντελεστή δύναμης για ένα αριθμό διαφορετικών γωνιών πρόσπτωσης ανέμου σε κατακόρυφο πλαίσιο με  $l/h=1.5$ . Για γωνίες από  $0^\circ$  ως  $45^\circ$  οι μέγιστες τιμές του συντελεστή δύναμης παρουσιάζονται σχεδόν σταθερές με  $c_f=3.0$ . Μια μικρή αύξηση παρατηρείται για γωνία προσπίπτοντος ανέμου  $30^\circ$  με αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση του συντελεστή δύναμης σε  $c_f=3.2$ .

Για διεύθυνση ανέμου από  $45^\circ$  ως  $90^\circ$  τα μέγιστα φορτία μειώνονται. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για γωνία προσπίπτοντος ανέμου (ο άνεμος παράλληλος του πλαισίου) οι μέγιστες τιμές του συντελεστή δύναμης δεν είναι μηδενικές, όπως για τον μέσο συντελεστή δύναμης, αλλά έχουν μια τιμή ίση με  $c_f=1.5$ .

Οι Robertson et al [10] μετρήσανε επίσης μέγιστες τιμές συντελεστή δύναμης για ένα κατακόρυφο πλαίσιο στο έδαφος. Παρόλα αυτά, οι τιμές τους δεν εμπεριέχονται στην δημοσίευσή τους. Ο βασικός σκοπός τους ήταν ο έλεγχος της αξιοπιστίας ενός παράγοντα που χρησιμοποιείται τότε για τον υπολογισμό πιέσεων σχεδιασμού από τον Βρετανικό κατασκευαστικό κώδικα, γνωστός ως συντελεστής επίδρασης μεγέθους (size effect factor)  $C_a$ .

#### **1.4.1.2 Ο μέσος συντελεστής δύναμης σε περατά κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος.**

Οι πρώτες δημοσιεύσεις για περατά κατακόρυφα πλαίσια εμφανίστηκαν τη δεκαετία του '50. Μέχρι σήμερα έχουν δημοσιευθεί πολλές μελέτες που αφορούν τις συγκεκριμένες κατασκευές [12-17,28]. Το κύριο χαρακτηριστικό των περατών κατακόρυφων πλαισίων είναι ότι για σχεδόν οποιαδήποτε τιμή αναλογίας πλάτους – ύψους (τουλάχιστον όταν  $l/h \geq 0.5$ ), ο μέσος συντελεστής δύναμης παρουσιάζεται να είναι σταθερός σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας του πλαισίου. Για μικρότερες τιμές της αναλογίας πλάτους – ύψους (η ιδιαίτερη περίπτωση του υψηλού και στενού πλαισίου) μια αύξηση του συντελεστή δύναμης θεωρείται πιθανή. Αποτελέσματα μετρήσεων και υπολογισμοί του συντελεστή δύναμης από προηγούμενες μελέτες παρουσιάζουν την τιμή του συντελεστή δύναμης να σχετίζεται μόνο με το πορώδες του πλαισίου και τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου πάνω στο πλαίσιο. Καμία μελέτη δεν έχει παρουσιάσει αποτελέσματα για τον συντελεστή δύναμης καθώς αυξάνεται η αναλογία πλάτους – ύψους, για την περίπτωση των περατών κατακόρυφων πλαισίων στο έδαφος.

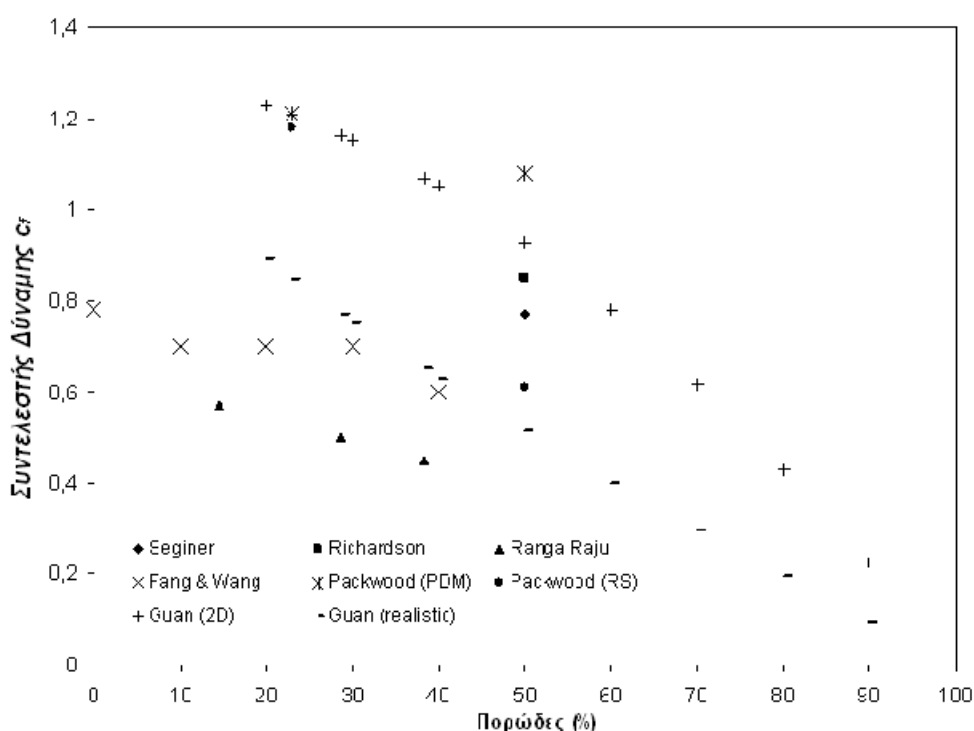
Βασικός λόγος της ομοιομορφίας του συντελεστή δύναμης σε όλη την επιφάνεια ενός περατού πλαισίου είναι και ο λόγος για τον οποίο αυτού του είδους η κατασκευή μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε σε πολλές εφαρμογές. Καθώς η ροή του ανέμου

προσπίπτει πάνω στο περατό πλαίσιο, διέρχεται του περατού υλικού (bleed flow) με αποτέλεσμα την επιβράδυνση του ανέμου στην υπήνεμη πλευρά του πλαισίου. Επίσης εμποδίζεται η ανάπτυξη των τυρβωδών φαινομένων. Από τη στιγμή που δεν υπάρχει αποκόλληση, δεν σχηματίζονται στρόβιλοι και δεν υπάρχουν οι έντονες αναρροφήσεις στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου, στις οποίες οφείλεται εν πολλοίς η αύξηση των φορτίων στο πλαίσιο. Αυτές είναι επίσης και τα πλεονεκτήματα των περατών σχετικά με τα μη περατά πλαίσια. Τα τυρβώδη φαινόμενα παύουν να υφίστανται, η ροή επιβραδύνεται και τα φορτία πάνω στο περατό πλαίσιο είναι αρκετά μειωμένα σε σχέση με ένα αδιαπέραστο πλαίσιο. Να σημειωθεί ότι σε μικρού πορώδους πλαίσια υφίσταται ακόμη στρόβιλος. Η μορφή της ροής γύρω από το πλαίσιο αναλύεται σε παράγραφο που ακολουθεί.

#### ***1.4.1.2.1 Ο μέσος συντελεστής δύναμης για κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος με διαφορετικό πορώδες***

Μέχρι σήμερα δεν έχει εξαχθεί κάποια κατηγοριοποίηση σχετικά με τον τρόπο μείωσης του μέσου συντελεστή δύναμης σε περατά κατακόρυφα πλαίσια. Όπως προαναφέρθηκε, όλες οι προηγούμενες ερευνητικές μελέτες που βρίσκονται στη διεθνή βιβλιογραφία δεν μπορούν εύκολα να τεθούν σε σύγκριση μόνο και μόνο με βάση το δεδομένο ότι μελετούν πλαίσια διαφορετικού πορώδους αλλά και διαφορετικών γεωμετρικών και αεροδυναμικών χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα συντελεστών δύναμης των μελετών αυτών είναι αρκετά διαφορετικά όταν μιλάμε για περιπτώσεις πλαισίων με διαφορετικό πορώδες. Ακόμη όμως και σε συγκρίσεις περιπτώσεων κατακόρυφων πλαισίων με το ίδιο πορώδες δεν είναι καθόλου απίθανο τα αποτελέσματα των συντελεστών δύναμης να είναι αρκετά διαφορετικά μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στη γεωμετρική μορφή του περατού υλικού και μερικές φορές στην κατανομή του πορώδους πάνω στο κατακόρυφο πλαίσιο.

Αποτελέσματα από μελέτες πειραμάτων που πραγματοποιηθήκαν και με τους τρεις δυνατούς τρόπους (πειράματα πλήρους κλίμακας, ανεμοσήραγγας και CFD) παρουσιάζονται στην *Εικόνα 6*. Οι μελέτες των Seginer [12] και Richardson [13] είναι οι μοναδικές οι οποίες μελέτησαν ίδιου τύπου περατό πλαίσιο με το ίδιο πορώδες (οριζόντιες ξύλινες σανίδες όπου κενά ανάμεσά τους δημιουργούσαν την επιθυμητή τιμή πορώδους). Τα αποτελέσματά τους βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία. Οι Ranga Raju et al [14] μετρήσανε σε ανεμοσήραγγα συντελεστές δύναμης για δυο διαστάσεων περατά κατακόρυφα πλαίσια, τα οποία είχαν πορώδες το οποίο μπορούσε να φτάσει και την τιμή του 40%. Τα αποτελέσματά τους όμως φαίνεται να είναι αρκετά χαμηλά. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι περατό υλικό τους είχε μεγάλο πάχος. Αυτό κατατάσσει τη μελέτη τους ουσιαστικά σε μια κατηγορία διαφορετική των πλαισίων μιας και η γεωμετρία ενός πλαισίου υποθέτει μηδαμινό πάχος.



**Εικόνα 6.** Ο μέσος συντελεστή δύναμης για διαφορετικές τιμές πορώδους ενός κατακόρυφου πλαισίου στο έδαφος. Αποτελέσματα δημοσιεύσεων στη διεθνή βιβλιογραφία.

Δυσδιάστατες αριθμητικές προσομοιώσεις παρουσιάστηκαν για περατά πλαίσια από τους Fang & Wang [15] αλλά και τον Packwood [17]. Βασικό ζητούμενο αυτών των μελετών ήταν η βέλτιστη προσομοίωση του περατού υλικού. Η πρώτη από τις μελέτες προσομοίωσε το πορώδες του πλαισίου δημιουργώντας απλά ένα πλαίσιο με οριζόντιες τομές (στα σημεία αυτά τα πλαίσια ήταν περατά). Η προσομοίωση του Packwood βασίστηκε στο νόμο του Darcy [25]. Οι Fang & Wang [15] υπολόγισαν ότι για μηδενικό πορώδες ο συντελεστής δύναμης έχει την τιμή  $c_f=0.78$ . Καθώς αυξάνεται το πορώδες από 10% σε 30%, ο  $c_f$  αποκτά μια σταθερή τιμή ίση με 0.7, ενώ για περαιτέρω αύξηση του πορώδους σε 40%, μετρήθηκε  $c_f=0.60$ . Είναι προφανώς ύποπτο, όσο αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυτών, ότι υπάρχει μια ανεξήγητη σταθερότητα στην τιμή του συντελεστή δύναμης για περατότητες από 10% ως και 30%. Τα αριθμητικά αποτελέσματα του Packwood [17] προήλθαν από δυο διαφορετικά μοντέλα τύρβης ( $k-\epsilon$  PDM and RS). Τα αποτελέσματα αυτά για πορώδες ίσο με 23% φαίνονται να είναι καλά και για τα δυο μοντέλα τύρβης. Για πορώδες όμως ίσο με 50%, μόνο το  $k-\epsilon$  PDM παρουσίασε σχετικά καλά αποτελέσματα (λίγο μεγαλύτερα αλλά κοντά στην πλειονότητα των αποτελεσμάτων). Το  $k-\epsilon$  RS μοντέλο τύρβης παρουσίασε στην περίπτωση αυτή μια πολύ χαμηλή τιμή.

Μια διαφορετική προσέγγιση για τα περατά υλικά παρουσιάστηκε από τους Guan et al [28]. Προτείνουν πως γενικά, οι περατοί ανεμοφράκτες (στους οποίους ανήκουν και τα κατακόρυφα πλαίσια) θα πρέπει να διαχωριστούν σε δυο κατηγορίες. Στους δυσδιάστατους ανεμοφράκτες (όπως η περίπτωση των κατακόρυφων πλαισίων) και στους λεγόμενους "ρεαλιστικούς" ανεμοφράκτες. Οι πρώτοι είναι αυτοί που το πάχος τους είναι αμελητέο και έτσι μπορούν να θεωρηθούν δυο διαστάσεων. Οι επονομαζόμενοι "ρεαλιστικοί", είναι εκείνοι όπου το πάχος τους πρέπει να



λαμβάνεται σοβαρά υπόψη επειδή επηρεάζει άμεσα την αεροδυναμική συμπεριφορά του ανεμοφράκτη. Ορίσανε το αεροδυναμικό πορώδες και το μετρήσανε βάσει της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου στην υπήνεμη περιοχή ενός ανεμοφράκτη, ακριβώς καθώς αυτή εξέρχεται από το περατό τμήμα του. Παρουσιάσανε μια σχέση του πορώδους και του αεροδυναμικού πορώδους (όπως ορίστηκε πριν) και προτείνανε πως για τους δυσδιάστατους ανεμοφράκτες οι δυο ποσότητες είναι ίσες. Αυτή η άποψη υποθέτει ότι για τα πλαίσια, που θεωρούνται δυσδιάστατοι ανεμοφράκτες αρκεί το πορώδες τους ώστε να χαρακτηριστούν, όσο αφορά την αεροδυναμική συμπεριφορά τους. Η αξιοπιστία της άποψης αυτής είναι υπό αμφισβήτηση. Με τη βοήθεια πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στον πειραματικό αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, για κατακόρυφα πλαίσια με το ίδιο πορώδες, υπολογίστηκαν διαφορετικοί συντελεστές δύναμης [23]. Η γεωμετρική μορφή του περατού υλικού είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ο οποίος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τη στιγμή που επηρεάζει την αεροδυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Για τους “ρεαλιστικούς” ανεμοφράκτες οι Guan et al [28] παρουσιάσανε ότι το πορώδες δεν μπορεί να περιγράψει την αεροδυναμική της κατασκευής. Αυτό το αποτέλεσμα προήλθε από μετρήσεις συντελεστή δύναμης πάνω σε “ρεαλιστικούς” ανεμοφράκτες οι οποίες ήταν αρκετά χαμηλότερες από μετρήσεις σε δυσδιάστατους ανεμοφράκτες του ίδιου πορώδους. Τέλος, καταλήξαν σε δυο μαθηματικούς τύπους για κάθε είδος ανεμοφράκτη, δυσδιάστατο ή “ρεαλιστικό”, όσο αφορά τη μείωση του συντελεστή δύναμης σε σχέση με το πορώδες ή το αεροδυναμικό πορώδες. Αποτελέσματα που προκύπτουν με τη χρήση και των δυο τύπων παρουσιάζονται στην *Εικόνα 6*.

Είναι προφανές πως τα αποτελέσματα των Ranga Raju et al [14] οι οποίοι χρησιμοποίησαν περατό υλικό με σημαντικό πάχος είναι πολύ πιο κοντά στις τιμές που παρουσιάζουν οι Guan et al [28] για τους επονομαζόμενους “ρεαλιστικούς” ανεμοφράκτες. Τα αποτελέσματα για το δυσδιάστατο ανεμοφράκτη μοιάζουν να είναι σε συμφωνία εκτός από τα αποτελέσματα των Fang and Wang [15] και του Packwood [17] για το  $k-\varepsilon$  RS μοντέλο τύρβης και τιμή πορώδους ίση με 50%.

Οι Richards & Robinson [16] παρουσίασαν μια παράμετρο με το όνομα δραστικό πορώδες  $\beta_e$  (effective porosity). Προτείνανε ότι αυτός ο τύπος πορώδους είναι αυτός που πλήρως χαρακτηρίζει μια περατή κατασκευή και ότι το πορώδες είναι ίσο με το δραστικό πορώδες όταν το περατό υλικό είναι πλέγμα με κυλινδρικές ίνες. Για όλες τις άλλες γεωμετρικές μορφές περατών υλικών το δραστικό πορώδες είναι μικρότερο του πορώδους. Τα εξαχθέντα αποτελέσματα με βάση το δραστικό πορώδες δείχνανε να συμφωνούν ελάχιστα με προηγούμενες μελέτες. Επιπρόσθετα, η έλλειψη εκτίμησης του δραστικού πορώδους και ότι ο υπολογισμός του θα μπορούσε να είναι μόνο πειραματικός ήταν ένα επίσης αρνητικό σημείο στη μελέτη αυτή. Καμιά άλλη μεταγενέστερη μελέτη δεν ενσωμάτωσε την ιδέα του δραστικού πορώδους, αν και αυτή η μελέτη είναι από τις ελάχιστες που προσπάθησαν να συσχετίσουν την γεωμετρική μορφή του περατού υλικού με την αεροδυναμική συμπεριφορά του.

Κάποιες προηγούμενες ερευνητικές μελέτες χρησιμοποίησαν, εκτός του πορώδους, μια άλλη παράμετρο ώστε να χαρακτηρίσουν πλήρως την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός περατού πλαισίου. Η παράμετρος αυτή ονομάζεται συντελεστής απώλειας πίεσης (pressure loss coefficient)  $k_r$ . Ο συντελεστής αυτός προκύπτει με τη βοήθεια πειράματος σε ανεμοσήραγα. Το περατό υλικό μπλοκάρει ολικά τη διατομή της ανεμοσήραγας και μετρείται η μεταβολή της πίεσης μεταξύ προσήνεμης και υπήνεμης περιοχής του περατού υλικού, για σταθερό προφίλ ταχύτητας ανέμου στην είσοδο της ανεμοσήραγας. Η μεταβολή της πίεσης στη συνέχεια διαιρείται με τη δυναμική πίεση και έτσι προκύπτει ο συντελεστής απώλειας πίεσης  $k_r$ . Με τον τρόπο

αυτό, εκτός από την τιμή πορώδους, η γεωμετρική μορφή του υλικού συνυπολογίζεται, από τη στιγμή που από δοκιμές για υλικά ίδιου πορώδους εξήχθησαν διαφορετικοί συντελεστές απώλειας πίεσης σε αρκετές περιπτώσεις, όπως αναφέρεται από τους Heisler & Dewalle [32]. Το αρνητικό σημείο, ήταν κι εδώ, όπως στην περίπτωση του δραστικού πορώδους [16], πως πρέπει να γίνει πειραματική μέτρηση για το συντελεστή αυτό. Μέχρι σήμερα, κανένας κώδικας δεν παρουσιάζει τη μεταβολή των φορτίων και κατά συνέπεια του συντελεστή δύναμης πάνω σε ένα κατακόρυφο περατό πλαίσιο, συναρτήσει κάποιας άλλης παραμέτρου πέραν του πορώδους του.

Όπως έχει ειπωθεί αρκετές φορές, στα περατά κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος είναι μειωμένα τα φορτία ανέμου. Προηγούμενες ερευνητικές μελέτες [18, 28] κάνανε εκτίμηση ενός συντελεστή, του λεγόμενου συντελεστή μείωσης  $K_p$ . Ο πολλαπλασιασμός του συντελεστή αυτού με το συντελεστή δύναμης του αδιαπέραστου πλαισίου μπορεί να δώσει το συντελεστή δύναμης για το αντίστοιχο περατό πλαίσιο με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά (Εξίσωση 5).

$$K_p = \frac{C_{f-porous}}{C_{f-solid}} \quad (5)$$

Με βάση την ανάλυση των δεδομένων των Ranga Raju et al [14] για περατότητες έως και 44% ο συντελεστής μείωσης βρέθηκε να είναι ίσος με  $K_p = 1-p$ . Ο Letchford [18] πρότεινε για περατότητες μέχρι 23% ένα συντελεστή μείωσης ίσο με  $K_p = 1-p^{1.5}$ . Η τιμή του συντελεστή αυτού έχει ενσωματωθεί στον Αμερικάνικο κατασκευαστικό κώδικα ASCE/SEI 7-05 [22] και ισχύει για περατότητες ως και 30%. Οι Guan et al [28] παρουσίασαν αυτό το συντελεστή να είναι ίσος με  $K_p = 1-p^{1.8}$ , για περατότητες μεγαλύτερες του 20%, για τους δυσδιάστατους ανεμοφράκτες. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τους συντελεστές μείωσης που αναφέρθηκαν συγκεντρωτικά.

**Πίνακας 6.** Συντελεστές μείωσης όπως παρουσιάστηκαν από προηγούμενες ερευνητικές μελέτες.

Πηγή από διεθνή βιβλιογραφία	% Πορώδες (έως)	Συντελεστής Μείωσης $K_p$
Ranga Raju et al [14]	44	$1-p$
Letchford [18]	23	$1-p^{1.5}$
Guan et al [28]	$\geq 20$	$1-p^{1.8}$

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 6 δείχνουν πως υπάρχει ασυμφωνία μεταξύ προηγούμενων μελετών αλλά και το συμπέρασμα πως πλαίσια υψηλού πορώδους έχουν μελετηθεί ελάχιστα.

Το θέμα του πορώδους είναι πολύ σημαντικό αλλά πρέπει να γίνει ξεκάθαρο ότι το πορώδες δεν μπορεί να είναι ο μοναδικός παράγοντας που να χαρακτηρίζει την αεροδυναμική συμπεριφορά των περατών υλικών και πλαισίων κατ' επέκταση. Καθώς η χρήση των περατών κατακόρυφων πλαισίων αυξάνεται ολοένα και περισσότερο τόσο αυξάνεται και η ανάγκη βελτίωσης του σχεδιασμού των κατασκευών αυτών. Η έρευνα πρέπει να εστιάσει και στον τομέα αυτό, ώστε να γίνει απόλυτα αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο περατή κατασκευή και άνεμος αλληλεπιδρούν.

#### 1.4.1.2.2 Ο μέσος συντελεστής δύναμης για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου.

Η διεύθυνση του προσπίπτοντα ανέμου εξετάστηκε από κάποιες προηγούμενες ερευνητικές μελέτες ώστε να αποσαφηνιστεί εάν η μείωση των φορτίων, που προκαλείται καθώς η διεύθυνση του ανέμου μετατρέπεται από κάθετη στο πλαίσιο σε άλλες διευθύνσεις ανέμου, ακολουθεί μια συγκεκριμένη τάση. Μελέτες των Seginer [12] και Richardson [13] δείχναν πως καθώς η διεύθυνση του ανέμου που προσπίπτει στο πλαίσιο αλλάζει σταδιακά από κάθετη σε παράλληλη η μείωση στο συντελεστή είναι συνημιτονοειδής (Εξίσωση 9).

$$c_f = c_{f-normal} \cos(f) \quad (9)$$

Όπου  $f$  είναι η διεύθυνση του προσπίπτοντα ανέμου ( $f=0^\circ$  για κάθετη διεύθυνση ανέμου).

Το 1999, οι Richards & Robinson [16] μελέτησαν σε ανεμοσήραγα την επίδραση της διεύθυνσης του ανέμου σε περατά πλαίσια και υπολόγισαν πως η μείωση του μέσου συντελεστή δύναμης ακολουθεί μια σχέση που εξαρτάται από το τετράγωνο του συνημίτονου της διεύθυνσης του ανέμου (Εξίσωση 10).

$$c_f = c_{f-normal} \cos^2(f) \quad (10)$$

Οι δυο αυτές σχέσεις, όπως προτάθηκαν από προηγούμενες ερευνητικές μελέτες, δεν φαίνεται να διαφέρουν και τόσο πολύ. Για την ακρίβεια, στα διασκορπισμένα δεδομένα που παρουσίασαν οι μελέτες αυτές, θα μπορούσαν να ταιριάξουν και οι δυο προαναφερθείσες σχέσεις (Εξισώσεις 9 & 10). Από τη στιγμή που στα περατά πλαίσια η μεταβολή της διεύθυνσης ανέμου δεν επιφέρει κάποια αύξηση στα φορτία ανέμου πάνω στην κατασκευή, ο παράγοντας αυτός δεν θεωρείται τόσο σημαντικός.

#### 1.4.1.3 Περατά και μη περατά υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια

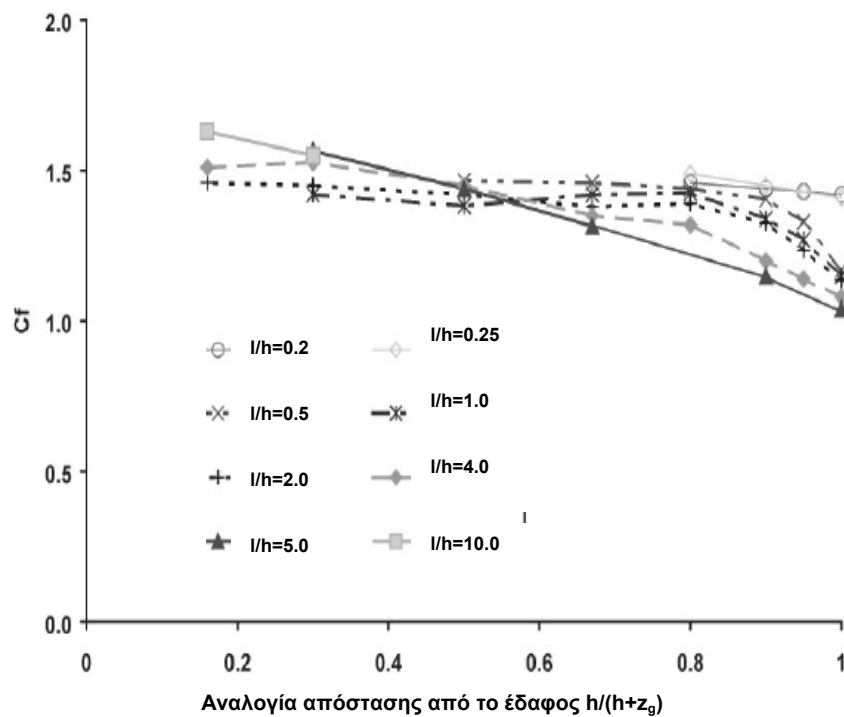
Τα φορτία ανέμου σε υπερυψωμένα πλαίσια είναι ένα θέμα που έχει μελετηθεί ελάχιστα. Μελέτες οι οποίες υπολόγισαν το συντελεστή δύναμης πάνω σε μια τέτοια απομονωμένη κατασκευή (χωρίς άλλες κατασκευές στον περιβάλλοντα χώρο που μπορούν να αλλάξουν τη μορφή της ροής) δημοσιεύτηκαν για πρώτη φορά το 2001. Ο Letchford [18] παρουσίασε μια εκτεταμένη δουλειά σε ανεμοσήραγα, παρέχοντας αποτελέσματα μέσων συντελεστών δύναμης για διαφορετικής γεωμετρίας υπερυψωμένα πλαίσια. Μελέτησε επίσης διαφορετικού πορώδους υπερυψωμένα πλαίσια όπως και την επίδραση της διεύθυνσης του προσπίπτοντα ανέμου σε τέτοιες κατασκευές. Αυτή η μελέτη παραμένει ίσως η μοναδική η οποία εξετάζει τόσο λεπτομερώς τα υπερυψωμένα πλαίσια, ενώ τα αποτελέσματα που έδωσε έχουν ενσωματωθεί σε κώδικες σχεδιασμού κατασκευών.

Οι Quinn et al [19] επίσης παρουσίασαν ένα πλήρους κλίμακας πείραμα, κατά το οποίο υπερυψωμένα πλαίσια διαφορετικής γεωμετρίας (για την ακρίβεια πινακίδες οδικής κυκλοφορίας) και διαφορετικών αναλογιών απόστασης από το έδαφος  $h/(z_g+h)$ . Οι τιμές συντελεστών δύναμης όμως που υπολόγισαν διαφέρουν των αντίστοιχων του Letchford [18] όπως θα δειχθεί στη συνέχεια.

Τέλος, οι Paulotto et al [20] πραγματοποίησαν ένα πείραμα σε ανεμοσήραγα για ένα υπερυψωμένο πλαίσιο με συγκεκριμένα όμως γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

#### 1.4.1.3.1 Αδιαπέραστα υπερυψωμένα πλαίσια με διαφορετικές τιμές αναλογίας απόστασης από το έδαφος ( $clearance\ ratio = h/(z_g+h)$ ).

Υπερυψωμένα πλαίσια με αναλογία απόστασης από το έδαφος κοντά στην τιμή  $h/(z_g+h) = 1$  δίνουν συντελεστές δύναμης παρεμφερείς με τα αντίστοιχα κατακόρυφα πλαίσια στο έδαφος. Καθώς το πλαίσιο γίνεται πιο υπερυψωμένο και η αναλογία απόστασης από το έδαφος πιο μικρή ( $h/(z_g+h) \leq 0.5$ ), ο μέσος συντελεστές δύναμης για όλη την επιφάνεια του πλαισίου, αυξάνεται και αποκτά μια τιμή ανάμεσα σε 1.4-1.5. Οι προηγούμενες μελέτες [18, 19] συμφωνούν πως καθώς η απόσταση του πλαισίου από το έδαφος αυξάνεται, η αποκόλληση από την κάτω πλευρά του πλαισίου είναι πλέον εξίσου σημαντική, με αποτέλεσμα οι σχηματιζόμενοι, στην υπήνεμη περιοχή, στρόβιλοι να είναι πιο έντονοι όπως και οι αντίστοιχες αναρροφήσεις. Διαφορετικά, θα μπορούσε να πει κανείς πως καθώς το πλαίσιο απομακρύνεται από το έδαφος αυξάνεται η επίδραση των αεροδυναμικών φαινομένων.



**Εικόνα 7.** Ο μέσος συντελεστής δύναμης για υπερυψωμένα πλαίσια σε σχέση με την αναλογία απόστασης από το έδαφος και για διαφορετικές τιμές αναλογίας πλάτους – ύψους.

Στην *Εικόνα 7*, η οποία παρουσιάστηκε από το Letchford [18], απεικονίζονται όλα όσα συζητήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Υπάρχουν παρόλα αυτά δυο περιπτώσεις που δεν αναφέρθηκαν. Αυτές είναι όταν το πλαίσιο έχει πολύ μεγάλη είτε πολύ μικρή αναλογία πλάτους – ύψους ( $l/h < 0.2$  or  $l/h > 10$ ). Στο ανωτέρω διάγραμμα οι ξεχωριστές αυτές περιπτώσεις, υποδεικνύονται με τους δυο κύκλους. Όταν το πλαίσιο γίνεται είτε υψηλό και λεπτό (μικρή τιμή  $l/h$ ), είτε επίμηκες και στενό (μεγάλη τιμή  $l/h$ ) οι αποκόλλησης από τα πλευρικά άκρα του πλαισίου δημιουργούν στρόβιλους πολύ κοντά μεταξύ τους. Αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται μίξη των

στροβίλων και τα έντονα τυρβώδη φαινόμενα να προκαλούν αυξημένα φορτία στο υπερυψωμένο πλαίσιο. Όπως παρουσιάζεται στην *Εικόνα 7*, αυτές είναι οι δυο περιπτώσεις που δεν ακολουθούν τα υπόλοιπα αποτελέσματα.

Ο *Πίνακας 7* παρουσιάζει αποτελέσματα των συντελεστών δύναμης όπως τα υπολογίσανε οι Letchford [18] και Quinn [19] για διάφορες αναλογίες πλάτους – ύψους και αναλογίες απόστασης από το έδαφος.

Τα αποτελέσματα των δυο μελετών δείχνουν έντονη ασυμφωνία. Οι τιμές των Quinn et al [19] είναι σε κάθε περίπτωση πολύ μικρότερες, εκτός της περίπτωσης όπου το πλαίσιο έχει αναλογίες  $l/h=8$  και  $h/(h+z_g)=0.1$ . Να σημειωθεί ότι οι τιμές συντελεστή δύναμης που αντιστοιχούν στον Letchford [18] στον *Πίνακα 7*, δεν είναι πραγματικές μετρήσεις του ίδιου για τα συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Επειδή όμως ο Letchford [18] έχει πραγματοποιήσει μετρήσεις για πολλές περιπτώσεις γεωμετρικών χαρακτηριστικών, οι τιμές του  $c_f$  που περιέχονται στον *Πίνακα 7*, είναι είτε πλαισίων με πολύ κοντινά χαρακτηριστικά είτε με βάση την τάση που παρουσιάζουν οι τιμές του συντελεστή δύναμης καθώς μεταβάλλονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως ο ίδιος ο Letchford [18] παρουσίασε.

**Πίνακας 7.** Αποτελέσματα του συντελεστή πίεσης για διαφορετικές αναλογίες πλάτους – ύψους και απόστασης από το έδαφος από προηγούμενες ερευνητικές μελέτες.

		<i>Συντελεστής Δύναμης <math>c_f</math></i>					
<i>l/h</i>		<i>h/(h+z<sub>g</sub>)</i>					
		<b>0.1</b>	<b>0.14</b>	<b>0.27</b>	<b>0.32</b>	<b>0.55</b>	<b>0.66</b>
<b>0.71</b>	Letchford [18]						1.44
	Quinn [19]						0.86
<b>0.75</b>	Letchford [18]						1.43
	Quinn [19]						1.05
<b>1</b>	Letchford [18]				1.42	1.38	
	Quinn [19]				1.01	0.92	
<b>8</b>	Letchford [18]	1.63	1.63	1.55			
	Quinn [19]	1.52	1.17	0.74			

Πιθανότατα, η απόκλιση των τιμών των Quinn et al [19] να προέρχεται από το γεγονός ότι τα πλαίσια που εξετάζουν είναι μικρών διαστάσεων, παρά την αντιστοιχία στις τιμές αναλογίας πλάτους – ύψους. Είναι χαρακτηριστικό επίσης πως για μεγαλύτερων διαστάσεων πλαίσια που ερευνούν οι Quinn et al [19] οι τιμές του συντελεστή δύναμης αυξάνονται. Για παράδειγμα τα δυο πλαίσια με αναλογία απόστασης από το έδαφος ίση με  $0.66$  που έχουν αναλογία πλάτους – ύψους ελάχιστης διαφοράς,  $0.71$  και  $0.75$ , δίνουν συντελεστές δύναμης αρκετά διαφορετικό ( $0.86$  και  $1.05$ ). Ο μικρότερος συντελεστής ανήκει σε πλαίσιο διαστάσεων  $0.75m \times 1.05m$  και ο υψηλός συντελεστής σε πλαίσιο διαστάσεων  $1.5m \times 2.0m$ . Τα μικρότερα πλαίσια που χρησιμοποίησε ο Letchford [18] στη μελέτη που πραγματοποίησε σε ανεμοσήραγga, είναι  $2.5m \times 2.5m$  σε πραγματικές διαστάσεις, βάσει της κλίμακας που χρησιμοποίησε.

Είναι πολύ πιθανό λοιπόν να μην είναι δυνατή η αναλογία πλάτους – ύψους να μεταβάλλει το συντελεστή δύναμης με τον ίδιο τρόπο για μικρών διαστάσεων κατακόρυφα πλαίσια.

#### ***1.4.1.3.2 Ο μέσος συντελεστής δύναμης σε υπερυψωμένα κατακόρυφα πλαίσια για διαφορετικές διευθύνσεις προσπίπτοντος ανέμου.***

Ασυμφωνία παρατηρείται στα αποτελέσματα των τριών μελετών [18, 19, 20] σχετικά με τη μεταβολή του συντελεστή δύναμης καθώς μεταβάλλεται η διεύθυνση του ανέμου. Ο Letchford [18], παρουσίασε το συντελεστή δύναμης να παραμένει σταθερός για διεύθυνση ανέμου από  $0^\circ$  ως  $45^\circ$ . Για μεγαλύτερες τιμές στη γωνία διεύθυνσης του ανέμου υπολόγισε μείωση των συντελεστών δύναμης μέχρι το μηδενισμό τους για παράλληλη στο πλαίσιο διεύθυνση ανέμου. Αντίθετα, οι Quinn et al [19], προτείνανε ότι για τα πλαίσια που δεν είναι αρκετά υπερυψωμένα υπάρχει μια συνημιτονοειδής μείωση του μέσου συντελεστή δύναμης για διεύθυνση ανέμου έως και  $30^\circ$ . Για πιο υπερυψωμένα πλαίσια, οι δυο προαναφερθείσες μελέτες βρίσκονται σε συμφωνία για την ανεξαρτησία του συντελεστή δύναμης από τη διεύθυνση του ανέμου καθώς αυτή μεταβάλλεται από  $0^\circ$  σε  $45^\circ$ . Οι Paulotto et al [20] εξήγαγαν αποτελέσματα για τον συντελεστή δύναμης για δυο διαφορετικές διευθύνσεις ανέμου ( $0^\circ$  και  $45^\circ$ ) για ένα συγκεκριμένης γεωμετρίας πλαίσιο με  $h/(z_g+h)=0.28$  και  $l/h = 5$ . Για την περίπτωση του ανέμου σε κάθετη διεύθυνση ως προς τη θέση του πλαισίου, μετρήσανε  $c_f = 1.65$ . Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί απόλυτα με το  $1.60$  που παρουσιάζει ο Letchford [18] για ίδιας γεωμετρίας υπερυψωμένο πλαίσιο. Παρόλα αυτά, για διεύθυνση ανέμου ίση με  $45^\circ$ , η μέτρηση του  $c_f = 1.15$ , έρχεται σε αντίθεση με την υπόθεση της των άλλων δυο μελετών για ανεξαρτησία του συντελεστή δύναμης από τη διεύθυνση του ανέμου, από  $0^\circ$  σε  $45^\circ$ , για πλαίσια που είναι σημαντικά υπερυψωμένα.

#### ***1.4.1.3.3 Ο μέσος συντελεστής δύναμης σε υπερυψωμένα πλαίσια με διαφορετικού πορώδους.***

Περατά υπερυψωμένα πλαίσια μελετήθηκαν μόνο από τον Letchford [18] και τα αποτελέσματα είναι ίδια με αυτά για την περίπτωση των κατακόρυφων πλαισίων στο έδαφος. Προτάθηκε, όπως ειπώθηκε προηγούμενα, ένας συντελεστής μείωσης ίσος με  $K_p = 1-p^{1.5}$  (Εξίσωση 5), όπου το  $p$  είναι το πορώδες του πλαισίου.

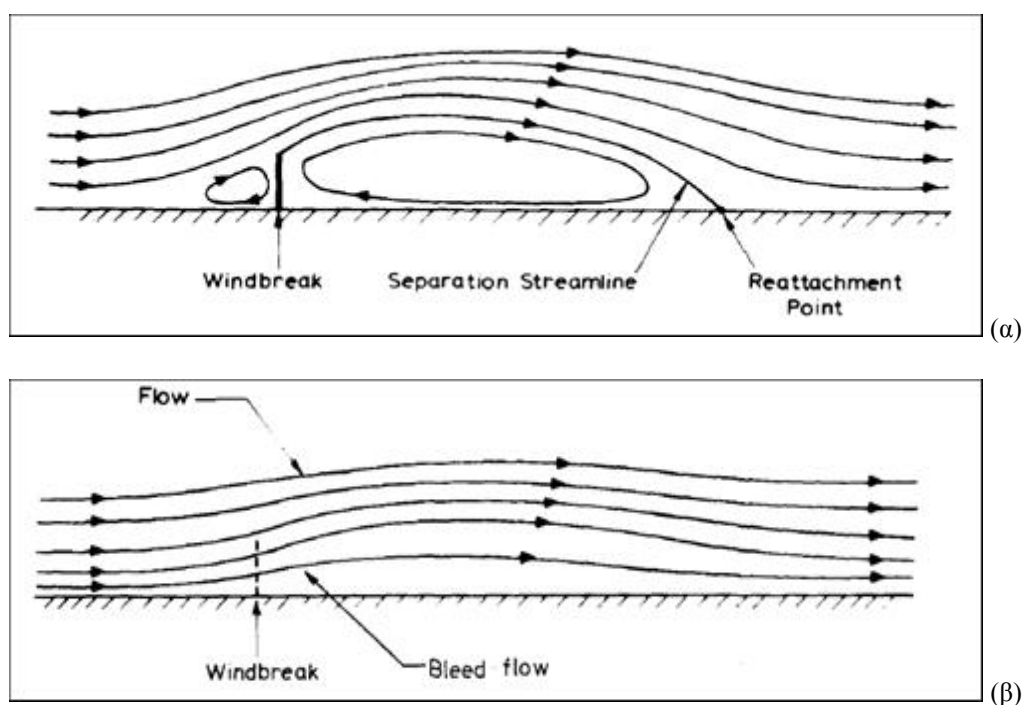
#### ***1.4.2 Η ροή γύρω από τα περατά ή μη κατακόρυφα πλαίσια.***

Η μορφή την οποία αποκτά η ροή του ανέμου καθώς αλληλεπιδρά με ένα κατακόρυφο πλαίσιο είναι ένα θέμα το οποίο έχει εκτενώς μελετηθεί. Αυτό που ενδιαφέρει κυρίως είναι η μορφή της ροής υπήνεμα του πλαισίου, από την στιγμή που ο ρόλος ύπαρξης του πλαισίου είναι η προστασία της περιοχής αυτής. Στην *Εικόνα 8* παρουσιάζεται μια ποιοτική αναπαράσταση της μορφής της ροής γύρω από περατά και μη περατά κατακόρυφα πλαίσια.

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στη μια η ροή δεν είναι δυνατό να διέλθει του πλαισίου εύκολα, αναγκάζεται να οδηγηθεί προς την κορυφή του με αποτέλεσμα την ύπαρξη της αποκόλλησης της ροής στην κορυφή του πλαισίου, αλλά και τη δημιουργία στροβίλου στην υπήνεμη περιοχή του. Στη δεύτερη περίπτωση, το υψηλό πορώδες επιτρέπει στη ροή να διαπεράσει το πλαίσιο και να εξέλθει από αυτό. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μικρή απόκλιση των γραμμών ροής από την αρχική διεύθυνσή τους η οποία για μεγάλες τιμές πορώδους μπορεί να γίνει μηδενική.

Ένα από τα αντικείμενα μελετών στη διεθνή βιβλιογραφία ήταν ο εντοπισμός της συγκεκριμένης τιμής του πορώδους (σε κάποιες μελέτες αναφέρεται ως κρίσιμο πορώδες) που η μορφή της ροής παύει να έχει την μορφή της *Εικόνας 8α* και αποκτά πιο ομαλή μορφή (*Εικόνα 8β*). Ακόμα και σήμερα υπάρχει μερική διαφωνία σχετικά με το μεταξύ ποιών τιμών κυμαίνεται η τιμή του πορώδους αυτής. Σε γενικές γραμμές πάντως η πλειονότητα των προηγούμενων μελετών της διεθνούς βιβλιογραφίας [29, 30, 31, 35, 38] παρουσιάζει την απώλεια στροβίλου στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου για περατότητες μεγαλύτερες από την τιμή  $p=30\%$ .

Βασικά χαρακτηριστικά της ροής της *Εικόνας 8α*, είναι η αποκόλληση της ροής στην κορυφή του πλαισίου (separation), η δημιουργία στροβίλου κάτω από τη γραμμή αποκόλλησης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στροβίλου και το σημείο επανακόλλησης (reattachment point) της ροής. Το σημείο επανακόλλησης της ροής υπήρξε επίσης αντικείμενο έντονης μελέτης. Το σημείο επανακόλλησης της ροής ορίζει το μέγεθος του στροβίλου, η ύπαρξη και θέση του οποίου υποδηλώνει την περιοχή μέγιστης μείωσης στις μέσες ταχύτητες αλλά και την αύξηση στα τυρβώδη φαινόμενα, παράγοντες πολύ σημαντικοί όπως θα αναδειχθεί στη συνέχεια.



**Εικόνα 8.** Η μορφή της ροής γύρω από διαφορετικής τιμής πορώδους πλαίσια.

Όπως ήταν αναμενόμενο, μελέτες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε ανεμοσήραγγες δίχως να προσομοιώνουν το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα παρουσίασαν το σημείο αυτό να βρίσκεται σε θέση πιο απομακρυσμένη από το πλαίσιο, από ότι πραγματικά βρισκόταν (Yaragal et al [34]). Οι Raine & Stevenson [29], βρήκανε για αδιαπέραστο πλαίσιο το σημείο αυτό να βρίσκεται σε θέση  $x=9h$ , όπου  $h$  είναι σε κάθε περίπτωση το ύψος της κατασκευής. Οι Gupta & Ranga Raju [33], για την ίδια περίπτωση παρουσίασαν το σημείο επανακόλλησης να είναι σε θέση  $x=14.5h$ , ενώ οι Dong et al [38] προτείνανε για τιμή πορώδους ίση με 5% ότι το σημείο επανακόλλησης βρίσκεται σε θέση  $x=14.5h$ , ενώ γενικά για περατότητες μικρότερες του 30%, ανάμεσα στις θέσεις  $x=8h-16h$ . Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν να βρίσκονται σε συμφωνία. Οι Dong et al [38], παρουσίασαν την μεταβολή του σημείου επανακόλλησης ανάλογα με την ταχύτητα του προσπίπτοντος στο πλαίσιο

ανέμου αλλά και του πορώδους (για περατότητες μικρότερες του 20%). Έγινε εμφανές πως το πορώδες είναι αυτό που επηρεάζει κυρίως τη μεταβολή της θέσης του σημείου αυτού, ενώ η ταχύτητα προκαλεί μικρές διακυμάνσεις. Για τιμές πορώδους από 0%-10% παρουσιάζεται μια απομάκρυνση τους σημείου επανακόλλησης της ροής. Για τιμές πορώδους όμως μεταξύ 10%-20%, υπάρχει δραστική υπαναχώρηση του σημείου. Για τιμές άνω του 30% δεν υπάρχει στρόβιλος και κατά συνέπεια και το σημείο επανακόλλησης παύει να υφίσταται.

Κάτι που επίσης επηρεάζει την υπήνεμη ροή και το σημείο επανακόλλησης κατ' επέκταση είναι η μορφή της προσήνεμης ροής. Οι Heisler & Dewalle [32], οι Raine & Stevenson [29] και οι Bradley & Mulhearn [31], δείξαν ότι η υπήνεμη ροή υφίσταται σημαντικές μεταβολές ανάλογα με την ένταση των τυρβωδών φαινομένων της προσήνεμης ροής. Η προσήνεμη ροή μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο τυρβώδης λόγω της τραχύτητας του εδάφους είτε λόγω της ατμοσφαιρικής αστάθειας. Οι τρεις μελέτες συμφώνησαν πως για σταθερή τιμή της παραμέτρου τραχύτητας του εδάφους  $z_0$  και ουδέτερη σταθερή κατάσταση της ατμόσφαιρας, το πεδίο των ταχυτήτων στην υπήνεμη περιοχή παραμένει σταθερό, ανεξάρτητα από την ταχύτητα της προσήνεμης ροής. Επίσης τονίστηκε ότι όσο πιο τυρβώδης είναι η ροή τόσο περισσότερο μειώνεται η απόσταση της θέσης του σημείου επανακόλλησης.

Ο Perera [30] έδειξε πως η μορφή του στροβίλου αλλάζει καθώς αυξάνεται η τιμή του πορώδους. Για αύξηση της τιμής του πορώδους (στα πλαίσια των τιμών πορώδους όπου υφίσταται στρόβιλος) το μέγεθος του στροβίλου μειώνεται ενώ ταυτόχρονα απομακρύνεται από το πλαίσιο, καθώς πύζεται από τη ροή που διέρχεται από το εσωτερικό του περατού πλαισίου. Οι Lee & Kim [37] απέδειξαν παρόμοια ότι για μεταβολή του πορώδους από 0% σε 20% ο στρόβιλος απομακρύνεται από το πλαίσιο. Το ύψος του στροβίλου βρέθηκε να είναι σχεδόν σταθερό και ίσο προσεγγιστικά με  $1.8h$  για τιμές πορώδους μεταξύ 0%-10% (Dong et al [38]). Για μεγαλύτερες τιμές πορώδους, το ύψος του μειώνεται δραστικά ως την εξάλειψή του.

Η μελέτη όλων των ανωτέρω, των χαρακτηριστικών της υπήνεμης ροής αλλά και όλων των παραμέτρων που την επηρεάζουν, πραγματοποιήθηκε με στόχο την κατάληξη σε αυτό που στην διεθνή βιβλιογραφία πολλές μελέτες ονομάζουν βέλτιστο κατακόρυφο πλαίσιο (ή εν γένει βέλτιστο ανεμοφράκτη). Η ερευνητικές μελέτες προσπαθούσαν να ορίσουν την τιμή του πορώδους του πιο αποδοτικού πλαισίου. Όλες οι προαναφερθείσες μελέτες καταλήξαν στο συμπέρασμα πως το "αντικείμενο" προστασίας είναι αυτό που καθορίζει την αποδοτικότητα του πλαισίου. Γενικά χαμηλή τιμή πορώδους σημαίνει μεγάλη περιοχή μείωσης της μέσης ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά αλλά υψηλά τυρβώδη φαινόμενα, ενώ υψηλή τιμή πορώδους αντιστοιχεί μικρή περιοχή μείωση της ταχύτητας και μικρή τυρβώδη δραστηριότητα.

Στην *Εικόνα 8α*, η εμφάνιση του στροβίλου υπήνεμα του πλαισίου είναι ένδειξη έντονης τυρβώδους δραστηριότητας. Προηγούμενες ερευνητικές μελέτες δείξαν πως η μείωση της τιμής του πορώδους οδηγεί στη αύξηση των υπήνεμων τυρβωδών φαινομένων [35, 37, 38], ενώ για μεγάλες τιμές πορώδους η μορφή της ροής γίνεται πιο ομαλή και λιγότερο τυρβώδης, αποκτώντας την μορφή της *Εικόνας 8β*. Η αποδοτικότητα του ανεμοφράκτη, πράγμα που βασίζεται στην επιλογή της τιμής του πορώδους του, στηρίζεται έντονα στη μορφή της υπήνεμης ροής. Η ύπαρξη τυρβωδών φαινομένων συνεπάγεται τις μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας, την ύπαρξη ριπών και την ύπαρξη έντονων ροφήσεων στο πλαίσιο αλλά και το έδαφος. Συνεπώς μπορεί να είναι αρκετά ζημιογόνα η ύπαρξη αυτών των φαινομένων για το πλαίσιο αλλά και την υπό προστασία περιοχή.

Ένας εξίσου βασικός παράγοντας, αλληλένδετος με την αποδοτικότητα του πλαισίου, είναι το μέγεθος της υπήνεμης περιοχής που διατηρεί κατά ένα σημαντικό



ποσοστό μειωμένες τις μέσες ταχύτητες υπήνεμα του πλαισίου. Είναι σαφές πως οι υψηλές ταχύτητες έχουν αποβεί καταστροφικές σε πολλές κατασκευαστικές περιπτώσεις. Για χαμηλού πορώδους πλαίσια η μείωση της ταχύτητας διατηρείται υψηλή, για μεγάλο μήκος υπήνεμα του πλαισίου, ενώ για τιμές μεγάλου πορώδους η μείωση της ταχύτητας είναι χαμηλή έως μηδαμινή ακόμα και στην υπήνεμη περιοχή πολύ κοντά στο πλαίσιο. Οι Raine & Stevenson [29] παρουσίασαν βάσει της μείωσης της ταχύτητας της υπήνεμης πλευράς, ότι το βέλτιστο πλαίσιο είναι αυτό που έχει τιμή πορώδους 20%. Οι Lee & Kim [37] παρουσίασαν επίσης πως η μεγαλύτερη περιοχή που διατηρεί σημαντικές τις μειώσεις της ταχύτητας προκύπτει για την ίδια τιμή πορώδους (20%). Οι Dong et al [38] δείχναν πως η μέγιστη προστατευόμενη περιοχή προερχόταν από τη χρήση 10% περατού πλαισίου. Αυτό που ήταν ξεκάθαρο ήταν πως ένα πλαίσιο που έχει τιμή πορώδους 0% δεν είναι αυτό που προσφέρει τη μέγιστη υπό προστασία επιφάνεια.

Συμπερασματικά, στην περίπτωση όπου για την υπό προστασία περιοχή απαιτείται η μείωση των μέσων τιμών των ταχυτήτων για μια περιοχή της υπήνεμης πλευράς, τα αποτελέσματα των μελετών που αναφερθήκανε στην προηγούμενη παράγραφο είναι έγκυρα. Σε άλλες περιπτώσεις όμως, όπου για παράδειγμα η χρήση του πλαισίου έχει ως στόχο να αποτρέψει τη μεταφορά υλικού (σκόνη, στάχτη, άμμος) ή να προστατέψει μια ευαίσθητη καλλιέργεια, η αποδοτικότητα ενός πλαισίου βασίζεται άμεσα στην ένταση της τύρβης στην υπήνεμη περιοχή. Η αυξημένη τυρβώδης δραστηριότητα (έντονες διακυμάνσεις της ταχύτητας, ριπές ανέμου, έντονες αναρροφήσεις) πρέπει να αποφευχθεί στην συγκεκριμένη περίπτωση. Για την περίπτωση προστασίας μιας ευαίσθητης καλλιέργειας ή μεταφοράς υλικού, ένα πλαίσιο με τιμή πορώδους κοντά στο 40% ώστε να αποτραπούν τα τυρβώδη φαινόμενα, μάλλον αποτελεί την καλύτερη λύση. Για καλλιέργειες ανθεκτικές είτε για την προστασία μιας άλλης κατασκευής (π.χ. θερμοκήπιο) ένα πλαίσιο με τιμή πορώδους 10%-20% μοιάζει ιδανικό.

## **2. Μελέτη και ανάλυση της ροής του ανέμου γύρω από ένα υπερυψωμένο πλαίσιο για διαφορετικές τιμές πορώδους, με τη βοήθεια πλήρους κλίμακας πειράματος και τρισδιάστατης αριθμητικής προσομοίωσης.**

Όπως παρουσιάστηκε προηγούμενα, δεν υπάρχουν αρκετές μελέτες στη διεθνή βιβλιογραφία που να αφορούν υπερυψωμένα πλαίσια κι ακόμη λιγότερες είναι εκείνες που αναφέρονται σε περατά υπερυψωμένα πλαίσια. Το μεγαλύτερο ποσοστό των μελετών αυτών όμως, αφορούν στην εκτίμηση των φορτίων ανέμου πάνω σε αυτές τις κατασκευές με κύριο στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους. Ο Letchford [18] μέτρησε σε ανεμοσήραγγα, συντελεστές πίεσης για ένα υπερυψωμένο πλαίσιο διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Μελέτησε επίσης την επίδραση της μεταβολής του πορώδους και της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στους συντελεστές δύναμης *c<sub>f</sub>*. Για περατά πλαίσια η ανάλυσή του έδειξε τη μείωση των φορτίων ανέμου καθώς αυξάνεται το πορώδες του πλαισίου. Ο ίδιος χρησιμοποίησε τιμές πορώδους από 0% ως 25%. Παρουσίασε επίσης μια μαθηματική σχέση για το συντελεστή δύναμης ενός πλαισίου, βάσει της οποίας ο συντελεστής δύναμης θα μπορούσε να υπολογιστεί από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του (αναλογία μήκους – ύψους και απόστασης από το έδαφος). Τα αποτελέσματα αρκετών μελετών δείχνανε να συμφωνούν με τη σχέση αυτή του Letchford [18] ([5, 6, 7, 8, 9, 30, 23]).

Φορτία ανέμου μελετήθηκαν επίσης και από τους Quinn et al [19] αλλά και Paulotto et al. [20]. Οι πρώτοι μετρήσανε, σε πλήρους κλίμακας πείραμα, μέσους συντελεστές δύναμης σε υπερυψωμένα πλαίσια διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα τους ήταν πολύ διαφορετικά από αυτά του Letchford [18]. Πιθανότατα τα μικρών διαστάσεων υπό εξέταση πλαίσια (πινακίδες οδικής σήμανσης) των Quinn et al. [19] δεν αλληλεπιδρούν με τον ίδιο τρόπο με τον άνεμο, ενώ τα φορτία που δέχονται είναι μικρότερα. Οι Paulotto et al [20] μετρήσανε φορτία ανέμου σε υπερυψωμένο πλαίσιο συγκεκριμένης γεωμετρίας. Σε μια ανεμοσήραγγα μελέτησανε μέσους συντελεστές δύναμης ενώ παρουσίασανε την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στο πλαίσιο, στο συντελεστή δύναμης. Για κάθετη γωνία πρόσπτωσης οι μετρήσεις των Paulotto et al [20] δείχνανε να συμφωνούν με του Letchford [18]. Για διαφορετική διεύθυνση ανέμου όμως τα αποτελέσματά τους απείχαν από αυτά του Letchford [18].

Η μορφή της ροής στην υπήνεμη περιοχή ενός υπερυψωμένου περατού πλαισίου, δεν υπήρξε αντικείμενο έντονης μελέτης. Οι Park & Lee [39] πραγματοποίησαν ένα πείραμα σε ανεμοσήραγγα, ώστε να αναλύσουν την αλληλεπίδραση ενός περατού υπερυψωμένου πλαισίου και ενός τριγωνικού πρίσματος, το οποίο ήταν τοποθετημένο στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου. Μάλιστα, παρουσίασανε το μη ομοίμορφο πορώδες, διαχωρίζοντας το πλαίσιο σε δυο τμήματα όπου το καθένα είχε διαφορετική τιμή πορώδους. Μετρήσανε μέσες τιμές συντελεστή δύναμης για διαφορετικές αναλογίες απόστασης από το έδαφος με σκοπό να μελετήσουνε τον τρόπο που αυτό επηρεάζει την προστασία της υπήνεμης περιοχής του πλαισίου (shelter effect).

Οι Kim & Lee [40] μελέτησανε ένα υπερυψωμένο πλαίσιο με τιμή πορώδους ίση με 40%. Οι περιπτώσεις απόστασης του πλαισίου από το έδαφος που εξετάσανε ήταν  $z_g = 0$  (το πλαίσιο βρίσκεται στο έδαφος) έως και  $z_g = 0.3h$ . Στόχος τους ήταν να αναδειχθεί ο τρόπος κατά τον οποίο η μεταβολή της απόστασης του πλαισίου από το έδαφος επηρεάζει την ικανότητα προστασίας του πλαισίου αλλά και την ένταση των τυρβωδών φαινομένων στην υπήνεμη περιοχή του. Βασικό συμπέρασμα της μελέτης αυτής ήταν ότι καλύτερο προστατευτικό μέσο αποτέλεσε το πλαίσιο το οποίο απείχε

από το έδαφος απόσταση ίση με  $z_g=0.1h$  και όχι το απόλυτα προσαρμοσμένο στο έδαφος πλαίσιο. Επίσης παρουσιάσανε ότι τα τυρβώδη φαινόμενα γίνονται πιο έντονα καθώς αυξάνει η απόσταση του πλαισίου από το έδαφος. Τα αποτελέσματα της μελέτης των Kim & Lee [40] συμφωνούν ποιοτικά με τα αποτελέσματα του Letchford [18], όσο αφορά τη μεταβολή της έντασης των τυρβωδών φαινομένων στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου ως προϊόν της συνδυασμένης μεταβολής γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλαισίου αλλά και της απόστασής του από το έδαφος

Στο τμήμα αυτό της διατριβής αναλύεται η ροή του ανέμου γύρω από ένα υπερυψωμένο πλαίσιο το οποίο έχει ως κάλυψη περατά ή μη περατά υλικά. Τα υλικά αυτά είναι δυο διαφορετικά γεωργικά δίχτυα πορώδους 38% και 62% αλλά και ένα αδιαπέραστο πλαστικό (0% πορώδες). Η ροή του ανέμου μελετήθηκε με πλήρους κλίμακας πείραμα αλλά και με τη βοήθεια τρισδιάστατης υπολογιστικής προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης συγκρίνονται με μετρήσεις του πλήρους κλίμακας πειράματος ώστε να αναδειχθεί η αξιοπιστία τους. Οι εμφάνιση στροβίλων στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου, η μείωση της μέσης ταχύτητας υπήνεμα του πλαισίου και η αποδοτικότητα του πλαισίου ως προστατευτικό μέσο εξετάστηκαν για κάθε περίπτωση διαφορετικού πορώδους του πλαισίου.

## 2.1 Πείραμα πλήρους κλίμακας

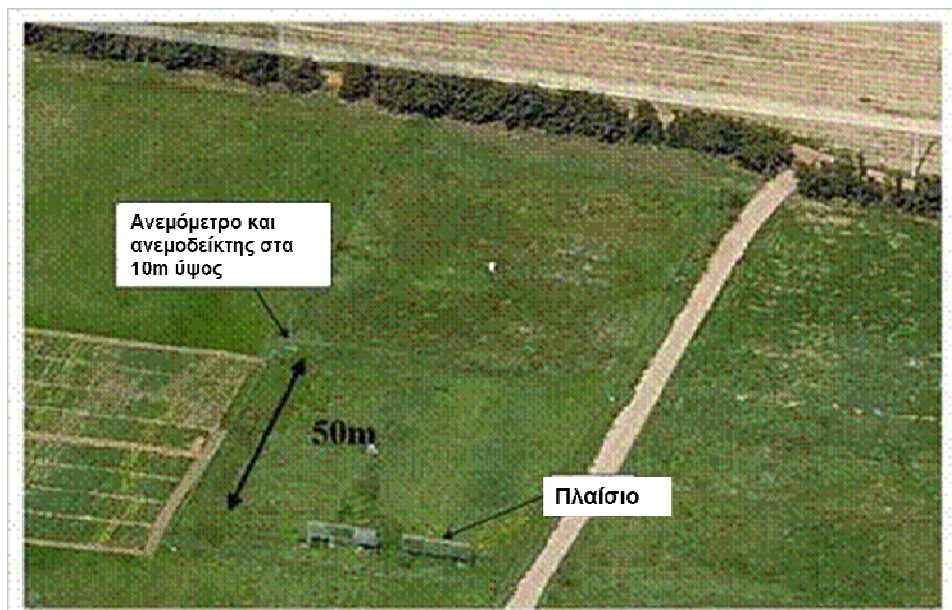
Πλήρους κλίμακας πείραμα πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια ειδική πειραματική κατασκευή στον πειραματικό αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Περιτροφικά ανεμόμετρα (rotary cup anemometers) τοποθετήθηκαν σε εννιά διαφορετικές θέσεις γύρω από το υπό μελέτη πλαίσιο ώστε να καταγραφούν δεδομένα και να πραγματοποιηθεί μια ποσοτική και ποιοτική μελέτη της ροής του ανέμου κοντά στο πλαίσιο (Εικόνα 9). Το διαστάσεις του πλαισίου είναι 7m μήκος ( $l$ ), 2m ύψος ( $h$ ) και είναι σε απόσταση από το έδαφος  $z_g=3m$ .

Όπως είναι διακριτό από την Εικόνα 9, το πλαίσιο έχει διαιρεθεί σε τρία τμήματα για λόγους προηγούμενου πλήρους κλίμακας πειράματος μέτρησης φορτίων ανέμου [23]. Τα κενά ανάμεσα στα τμήματα του πλαισίου είναι αρκετά μικρής επιφάνειας (σχεδόν 6% της συνολικής επιφάνειας του πλαισίου) ώστε να μην είναι δυνατό να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τη ροή του ανέμου γύρω από το πλαίσιο.

Τρία ανεμόμετρα τοποθετήθηκαν προσήνεμα του πλαισίου και τρία αντίστοιχα υπήνεμα (τα τρία υπήνεμα ανεμόμετρα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9 με κύκλους ώστε να γίνουν πιο διακριτά) Στο σύνολό τους τα έξι προαναφερθέντα ανεμόμετρα τοποθετήθηκαν συγκεκριμένα συμμετρικά σε ύψος ίσο με το μισό του πλαισίου με τη συνολική απόστασή τους από το έδαφος να είναι  $z_g+h/2=4m$  και 0.8m μακριά από το πλαίσιο. Άλλα δυο ανεμόμετρα τοποθετήθηκαν 0.8m μακριά από τα ελεύθερα άκρα του υπερυψωμένου πλαισίου σε ύψος ακριβώς ίσο με τα έξι προηγούμενα. Το ένατο ανεμόμετρο τοποθετήθηκε σε 30cm πάνω από την κορυφή του πλαισίου (σε ύψος 5.30m δηλαδή) και ακριβώς στο μέσο του μήκους του πλαισίου. Εκτός των εννιά αυτών ανεμομέτρων υπήρχανε δύο ακόμη μακριά από την κατασκευή, τοποθετημένα σε ιστό 10m ύψους. Τα ανεμόμετρα βρισκόντουσαν σε ύψη 10m και 5m. Στην κορυφή του ιστού υπήρχε επίσης ανεμοδείκτης (ύψος 10m) ο οποίος κατέγραφε τη διεύθυνση του ανέμου.

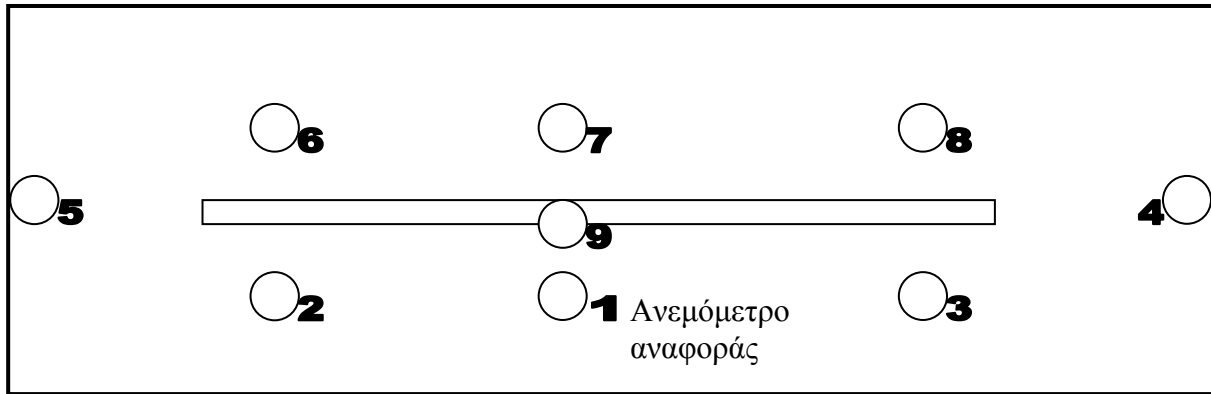


**Εικόνα 9.** Πείραμα πλήρους κλίμακας. Περιστροφικά ανεμόμετρα στο υπερυψωμένο πλαίσιο για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου. Οι κύκλοι εστιάζουν στα τρία υπήνεμα ανεμόμετρα.



**Εικόνα 10.** Η θέση του ιστού 10m ύψους σε σχέση με την κατασκευή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις για το πλήρους κλίμακας πείραμα.

Οι μετρήσεις δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν όλες ταυτόχρονα διότι μόνο πέντε περιστροφικά ανεμόμετρα ήταν διαθέσιμα. Για το λόγο αυτό οι μετρούμενες ταχύτητες κανονικοποιήθηκαν με την μέτρηση του ανεμομέτρου στο σημείο 1 (ανεμόμετρο αναφοράς), το οποίο βρισκόταν στο κέντρο του μήκους του πλαισίου και 0.8m μακριά από αυτό (Εικόνα 11).



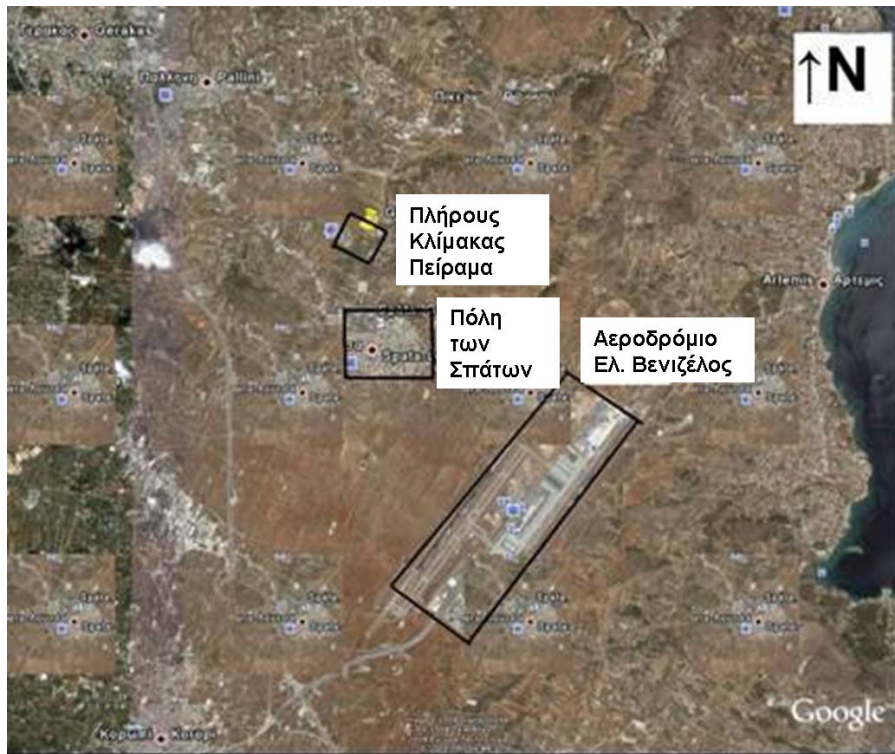
**Εικόνα 11.** Κάτοψη των θέσεων των εννιά ανεμομέτρων γύρω από το πλαίσιο.

Ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων καταγράφηκε και για τις δυο περιπτώσεις όπου το πλαίσιο είναι περατό είτε όχι. Μόνο κάθετη διεύθυνση ανέμου προς το πλαίσιο ελήφθη υπόψη ( $\pm 20^\circ$ ), ενώ αγνοήθηκαν τιμές μετρούμενων ταχυτήτων κάτω των  $2m/s$  για την αποφυγή σφαλμάτων εξαιτίας της μειωμένης ευαισθησίας των ανεμομέτρων στις χαμηλές ταχύτητες. Η ακρίβεια των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου με τα συγκεκριμένα όργανα ήταν  $0.1m/s$ .

Με την πειραματική αυτή κατασκευή η επίδραση της μεταβολής της τιμής του πορώδους του υλικού κάλυψης του πλαισίου στην ροή του ανέμου γύρω από το πλαίσιο μελετήθηκε. Επιπρόσθετα, τα πειραματικά δεδομένα συγκρίθηκαν με αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης, τα οποία και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, ώστε να εκτιμηθεί η αξιοπιστία των υπολογιστικών μεθόδων και να εντοπιστούν οι κρίσιμες παράμετροι που οδηγούν σε μια αξιόπιστη προσομοίωση.

## 2.2 Χαρακτηριστικά του ανέμου

Τα χαρακτηριστικά του ανέμου μετρήθηκαν στην τοποθεσία όπου διεξήχθη το πείραμα για περίοδο επτά ετών. Οι μέσες τιμές ταχυτήτων ανέμου αλλά και η διεύθυνση του ανέμου σε ύψος  $10m$  καταγράφονται κάθε 2 λεπτά. Η αξιοπιστία των μετρήσεων αυτών ελέγχθηκε με τη βοήθεια δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών, Ελευθέριος Βενιζέλος. Το αεροδρόμιο βρίσκεται σε μια απόσταση των  $5.7km$  νότια της τοποθεσίας του πλήρους κλίμακας πειράματος-πειραματικός αγρός (Εικόνα 12). Οι μέσες τιμές της ταχύτητας του ανέμου μετρούνται από το σταθμό του αεροδρομίου κάθε 30 λεπτά. Επειδή η σύγκριση δεν ήταν εφικτή τα δεδομένα του πειραματικού αγρού, μέσες τιμές ταχύτητας των 2 λεπτών, μετετράπησαν σε μέσες τιμές των 30 λεπτών.

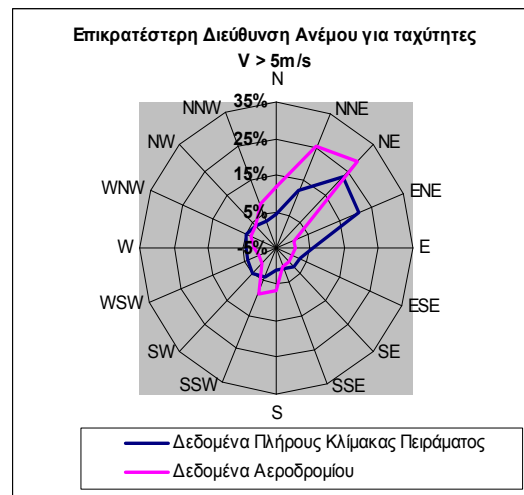
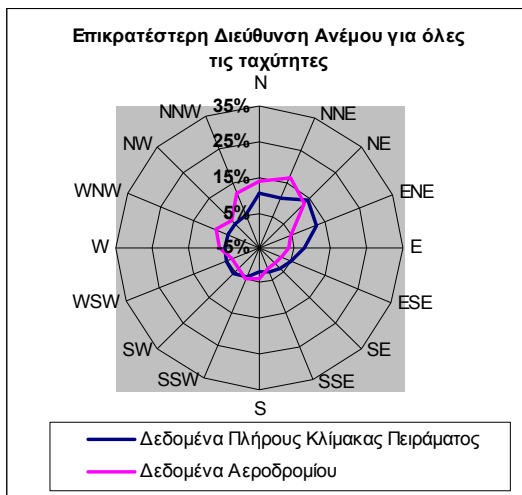


**Εικόνα 12.** Χάρτης της περιοχής όπου πραγματοποιήθηκε το πλήρους κλίμακας πείραμα. Στον χάρτη είναι ορατό και το Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών, Ελ. Βενιζέλος (πηγή: Google Earth)

Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια οι επικρατέστεροι άνεμοι είναι οι βορειοανατολικοί και για τις δυο τοποθεσίες. Ο χάρτης που παρουσιάζει η *Εικόνα 12*, υποδηλώνει ότι τα χαρακτηριστικά του ανέμου για τις δυο τοποθεσίες θεωρούνται δικαιολογημένα παρεμφερή.

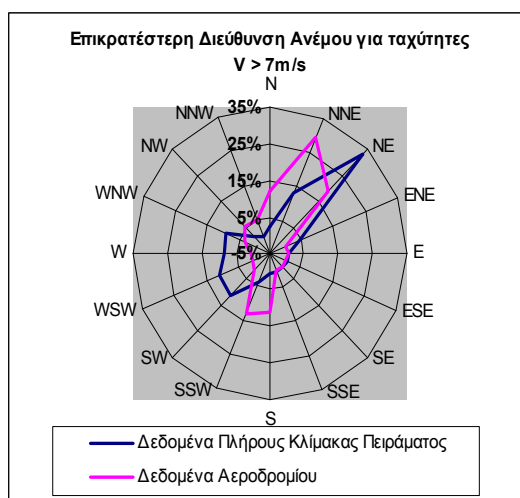
Η *Εικόνα 13* παρουσιάζει την κατανομή των διευθύνσεων ανέμου στην τοποθεσία του πλήρους κλίμακας πειράματος συγκριτικά με την κατανομή για την τοποθεσία του αεροδρομίου. Οι μετρήσεις διευθύνσεων ανέμου αντιστοιχούν σε διάρκεια ενός έτους (2003). Τα διαγράμματα δείχνουν πως για το πλήρους κλίμακας πείραμα, οι βορειοανατολικοί (ΒΑ) είναι οι επικρατέστεροι, οι πιο συχνοί άνεμοι. Για χαμηλές ταχύτητες, κάτω των  $5\text{m/s}$ , οι βόρειοι άνεμοι παρουσιάζονται επίσης σημαντικοί. Καθώς όμως οδηγούμαστε σε ταχύτητες μεγαλύτερες των  $7\text{m/s}$  το ποσοστό συχνότητας εμφάνισης των ΒΑ ανέμων αυξάνεται αισθητά. Για ταχύτητες άνω των  $5\text{m/s}$ , οι βορειοανατολικοί άνεμοι αποτελούν ποσοστιαία πάνω από το 50% των παρατηρούμενων διευθύνσεων ανέμου.

Στην ίδια εικόνα υπάρχουν παρόμοια αποτελέσματα για τις μετρήσεις του σταθμού του αεροδρομίου. Οι συγκρίσεις δείχνουν πως οι κυρίαρχοι άνεμοι είναι ίδιοι για τις δυο τοποθεσίες για τιμές ταχυτήτων μέχρι  $5\text{m/s}$ , δηλαδή οι βορειοανατολικοί άνεμοι. Για μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 13γ*, υπάρχει μια ελαφρά απόκλιση. Η απόκλιση αυτή οφείλεται πιθανότατα στην επίδραση της τοπικής μορφολογίας του εδάφους.



(α)

(β)

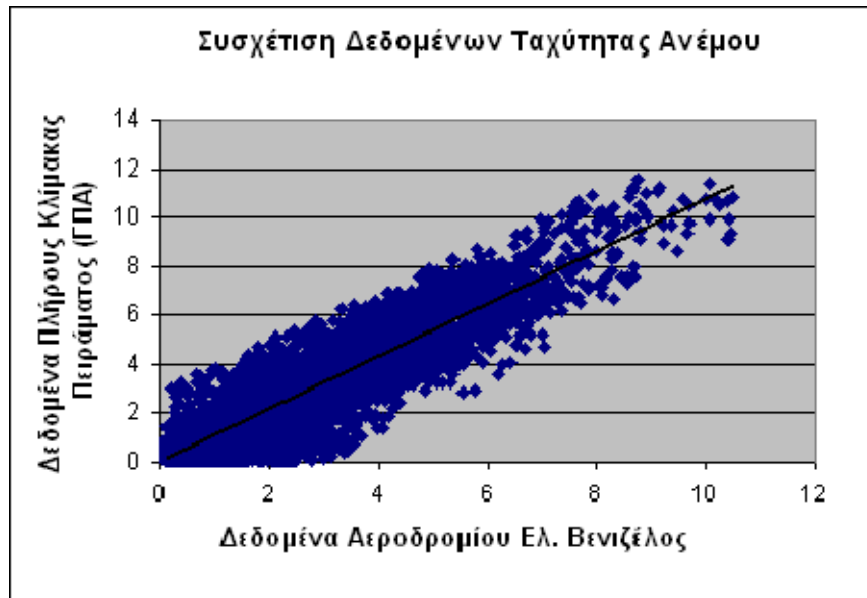


(γ)

**Εικόνα 13.** Ιστόγραμμα διεύθυνσης του ανέμου για τις δυο διαφορετικές τοποθεσίες από μετρήσεις διάρκειας ενός χρόνου (2003): α) για όλες τις ταχύτητες, β) για ταχύτητες άνω των 5m/s, γ) για ταχύτητες άνω των 7m/s

Οι τιμές των ταχυτήτων, όπως μετρήθηκαν για ένα ολόκληρο έτος (2003), στις δυο τοποθεσίες (πειραματικός αγρός και αεροδρόμιο) τέθηκαν επίσης υπό σύγκριση. Η Εικόνα 14 παρουσιάζει το διάγραμμα συσχέτισης (correlation) ανάμεσα στις μέσες τιμές ταχύτητας στα 10m ύψος από το έδαφος, για περιόδους 30 λεπτών, στις δυο τοποθεσίες του πειραματικού αγρού και του αεροδρομίου.

Η συσχέτιση των δυο σετ δεδομένων βρέθηκε να είναι αρκετά καλή ( $R^2 = 0.8$ ). Παρόλα αυτά, οι μέσες ταχύτητες ανέμου όπως μετρήθηκαν στον πειραματικό αγρό είχαν υψηλότερη τιμή από τις ταχύτητες, όπως μετρήθηκαν στο αεροδρόμιο, κατά 7%. Η μικρή αυτή ασυμφωνία μπορεί να αποδοθεί επίσης στην επίδραση της τοπικής μορφολογίας του εδάφους.



**Εικόνα 14.** Συσχέτιση των δεδομένων ταχύτητας ανέμου που συλλέχθηκαν από το πλήρους κλίμακας πείραμα και το μετεωρολογικό σταθμό του αεροδρομίου Ελ. Βενιζέλος.

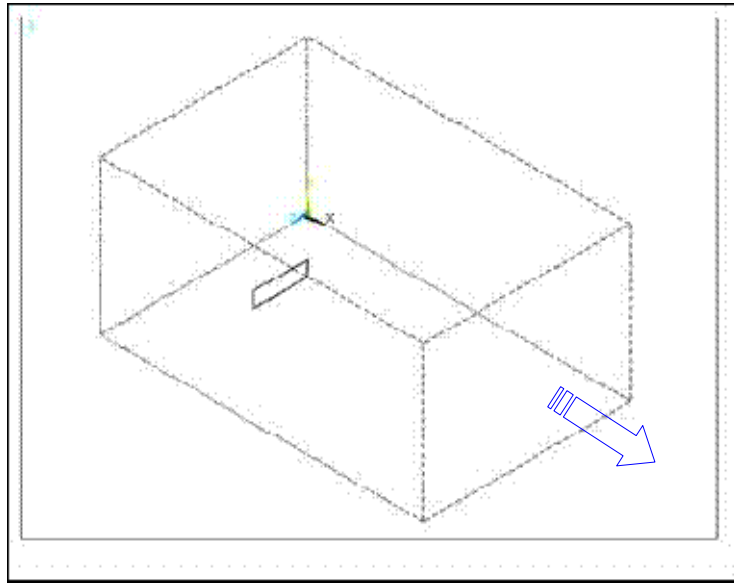
### 2.3 Αριθμητική Προσομοίωση του προβλήματος

Η αριθμητική προσομοίωση του υπερυψωμένου πλαισίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS-FLOTRAN. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι η θεωρητική βάση του προγράμματος αυτού. Ένα τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS-FLOTRAN ώστε να προσομοιωθεί η ροή γύρω από το υπερυψωμένο πλαίσιο. Το πλαίσιο προσομοιώθηκε σαν ένα υπερυψωμένο εμπόδιο κάθετο στη διεύθυνση της ροής του ανέμου εντός μιας ορθογώνιας τρισδιάστατης ανεμοσήραγγας με τις κατάλληλες διαστάσεις. Η ανεμοσήραγγα στο υπολογιστικό μοντέλο είχε διαστάσεις  $x=42m$ ,  $y=20m$  και  $z=27m$ , ή αντίστοιχα αδιαστατοποιώντας με το ύψος του πλαισίου  $h=2m$ ,  $x=21h$ ,  $y=10h$  και  $z=13.5m$  (Εικόνα 15).

Τρεις περιπτώσεις προσομοιώθηκαν αντίστοιχα με τις τρεις διαφορετικές περατότητες του πλαισίου. Δύο περατά υλικά κάλυψης με περατότητες 38% και 62% προσομοιώθηκαν ως πορώδη υλικά και συγκρίθηκαν με την περίπτωση της αδιαπέραστης κάλυψης προσομοιώνοντας το πλαστικό υλικό κάλυψης.

Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από διαφορετικά στοιχεία (elements) σε κάθε περίπτωση με βάση το υπό προσομοίωση υλικό κάλυψης. Στην περίπτωση της προσομοίωσης των περατών γεωργικών δικτύων έπρεπε να διακριτοποιηθεί και το εσωτερικό του περατού υλικού. Αντίθετα, στην περίπτωση της μη περατής κάλυψης το πλαίσιο προσομοιώθηκε ως ένα αδιαπέραστο εμπόδιο, με συνέπεια να μην απαιτείται η διακριτοποίηση του εσωτερικού του. Τρισδιάστατα ορθογώνια εξάεδρα και τρισδιάστατα τετράεδρα ήταν τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του υπολογιστικού πλέγματος. Προτιμήθηκε η χρήση και των δυο τύπων στοιχείων, διότι ενώ τα τρισδιάστατα τετραεδρικά στοιχεία είναι πιο εύχρηστα και προσαρμόζονται πιο εύκολα στη δημιουργία του πλέγματος, η χρήση των εξαεδρικών στοιχείων μπορεί να αποφέρει βελτίωση του πλέγματος (refinement), αποδοτική προσομοίωση του πλαισίου και κατά συνέπεια βελτίωση στη σύγκλιση.

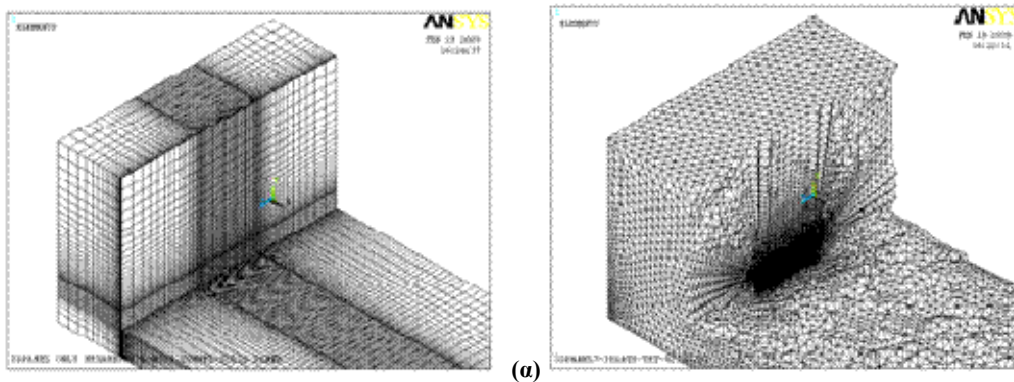




**Εικόνα 15.** Το μοντέλο του υπερυψωμένου πλαισίου εντός της ανεμοσήραγγας όπως πραγματοποιήθηκε για την υπολογιστική προσομοίωση.

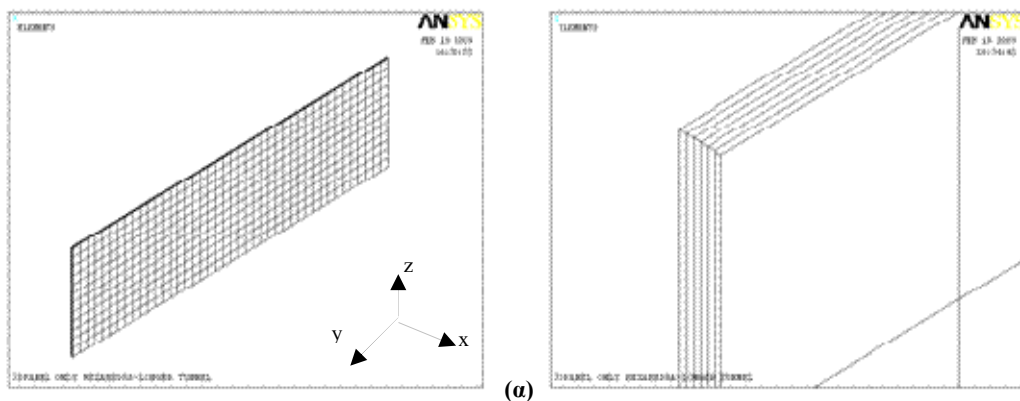
Σαν αποτέλεσμα τα τρισδιάστατα τετραεδρικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος και προσομοίωση της ροής γύρω από το αδιαπέραστο υπερυψωμένο πλαίσιο, ενώ τα τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία για την προσομοίωση του πλαισίου με περατή κάλυψη γεωργικών δικτύων.

Στις *Εικόνες 16α* και *16β* παρουσιάζεται μια τομή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων ακριβώς στο άνω άκρο του προσομοιωμένου πλαισίου και για τις δυο περιπτώσεις κάλυψης. Να σημειωθεί πως η μορφή του πλέγματος έχει την ίδια εικόνα και σε τομή στο κάτω άκρο του. Είναι γνωστό πως έντονα τυρβώδη φαινόμενα εμφανίζονται κατά την αποκόλληση της ροής του ανέμου, στις περιοχές των ελευθέρων άκρων του [41]. Για το λόγο αυτό απαιτείται πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή κοντά στο πλαίσιο.



**Εικόνα 16.** Τομές του πλέγματος πλησίον του πλαισίου. (α) Τρισδιάστατα ορθογώνια εξαεδρικά στοιχεία, (β) Τρισδιάστατα τετραεδρικά στοιχεία.

Η κατασκευή του πλέγματος στο περατό πλαίσιο παρουσιάζεται στη *Εικόνα 17*. Η μεγέθυνση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων στο πλαίσιο δίνεται για γίνει εμφανής η διακριτοποίηση του πλαισίου στο εσωτερικό του στην περίπτωση αυτή όπως και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου στοιχείων.



**Εικόνα 17.** Η κατασκευή του πλέγματος στο μοντέλο-πλαίσιο για κάλυψη περατού υλικού: (α) στοιχεία στην συνολική επιφάνεια του πλαισίου, (β) μεγέθυνση – στοιχεία στο εσωτερικό του πλαισίου

Το πάχος του περατού πλαισίου με το οποίο προσομοιώθηκαν τα γεωργικά δίχτυα ήταν ίσο με  $3cm$ . Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, σε παράγραφο που εξηγείται αναλυτικά ο τρόπος που τα γεωργικά δίχτυα προσομοιώνονται), το πάχος του πλαισίου δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του περατού υλικού. Σχετικά μεγαλύτερη είτε μικρότερη τιμή πάχους θα μπορούσε να επιλεγεί. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε για δυο λόγους. Αρχικά, η τιμή του πάχους επιλέχθηκε σχετικά μικρή με αποτέλεσμα να είναι και η αναλογία πάχους – ύψους μικρή της υπό προσομοίωσης κατασκευής και να μην επηρεάζεται η αεροδυναμική συμπεριφορά της (η μεταβολή της αναλογίας πάχους – ύψους επηρεάζει την αποκόλληση της ροής). Επίσης, εάν το πλαίσιο προσομοιώνόταν με την ακριβή τιμή πάχους των γεωργικών δικτύων (διάμετρος της ίνας του γεωργικού δικτυού), η οποία είναι  $0.2mm$ , τότε θα σχηματιζόντουσαν πολύ μικρής αναλογίας πάχους – ύψους στοιχεία και η γεωμετρία του πλέγματος κοντά στο πλαίσιο να μην χαρακτηριζόταν από ομοιομορφία. Αυτό είναι δυνατό συχνά να προκαλεί προβλήματα στη σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου. Η τελική επιλογή βασίστηκε στα ανωτέρω επιχειρήματα και εκτιμήθηκε με δοκιμές διαφορετικών τιμών πάχους του περατού πλαισίου.

Οι  $y$ - $z$  επιφάνειες του πλαισίου (Εικόνα 17α) έχουν διακριτοποιηθεί ομοιόμορφα με τετραγωνικά στοιχεία. Το ύψος του πλαισίου διαιρείται από 12 στοιχεία και το πλάτος του σε 42. Για να είναι κατάλληλη και αξιόπιστη η προσομοίωση ενός περατού πλαισίου απαιτείται πύκνωση του πλέγματος στο εσωτερικό του.

Η αριθμητική λύση εξαρτάται άμεσα από τη σωστή διακριτοποίηση ιδιαίτερα στο εσωτερικό του περατού υλικού. Για να εξετασθεί το αριθμητικό σφάλμα που μπορεί να προκύψει κατά τη διακριτοποίηση του εσωτερικού του περατού υλικού, προσομοιώθηκε η ροή σε μια ανεμοσήραγγα η οποία ήταν πλήρως φραγμένη από ένα περατό υλικό. Οριακή συνθήκη εισόδου ορίστηκε η ομοιόμορφη ταχύτητα ανέμου (σταθερή ταχύτητα κατά όλο το ύψος της ανεμοσήραγγας) ενώ στην έξοδο ορίστηκε η πίεση ίση με το μηδέν (η ροή οδηγείται από την κλειστή ανεμοσήραγγα σε πολύ μεγαλύτερο χώρο - εκτόνωση). Η ροή ακολουθεί το νόμο του *Forcheimer* [42], όπου στην περίπτωση αυτή η μεταβολή της πίεσης κατά μήκος του περατού εμποδίου για μια συγκεκριμένη τιμή ταχύτητας πρόσπτωσης στο εμπόδιο, μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση (Εξίσωση 11):

$$\Delta P = \beta V + \alpha V^2 \quad (11)$$

εφόσον και εάν οι παράμετροι του πορώδους του υλικού,  $\alpha$  και  $\beta$ , είναι γνωστές με τη βοήθεια εργαστηριακών μετρήσεων (περισσότερα για την εξίσωση αυτή θα συζητηθούν αναλυτικότερα στη συνέχεια). Βρέθηκε ότι η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων βελτιώνεται ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων στα οποία διαιρείται το πάχος του περατού υλικού (Εικόνα 17β). Πιο συγκεκριμένα, για δεδομένη τιμή πάχους πλαισίου, η διαφορά (εκφραζόμενη ως επί τοις εκατό σφάλμα) ανάμεσα στο θεωρητικό υπολογισμό της μεταβολής της πίεσης ( $\Delta P$ ) (Εξίσωση 11) και των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης ήταν 4% όταν το συνολικό πάχος του υλικού καλυπτόταν από ένα στοιχείο, μειωνόταν αισθητά στο 0.04% για τρία στοιχεία, ενώ για δέκα στοιχεία γινόταν ουσιαστικά αμελητέα και ίση με  $3 \times 10^{-5}\%$ . Εξήχθη το συμπέρασμα πως η προσομοίωση του εσωτερικού του περατού υλικού θα έπρεπε να γίνει με τουλάχιστον τρία στοιχεία (το πάχος του να διαιρείται με τρία στοιχεία) ώστε να εξαχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

## 2.4 Μοντελοποίηση της τύρβης

Τα  $k-\varepsilon$  και  $k-\varepsilon$  RNG μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την ορθή προσομοίωση των τυρβωδών φαινομένων. Είναι γνωστό πως το μοντέλο  $k-\varepsilon$  υπερεκτιμά σε πολλές περιπτώσεις την κινητική ενέργεια της τύρβης ( $k$ ). Αυτό συνήθως συμβαίνει σε ροές όπου υφίστανται πρόσπτωση σε εμπόδια και το πρόβλημα είναι έντονα ορατό σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλές μεταβολές της κλίσης της ταχύτητας (velocity gradient), δηλαδή στις περιοχές όπου παρατηρείται αποκόλληση της ροής [41]. Το μοντέλο  $k-\varepsilon$  RNG αντιμετωπίζει την μετατροπή της κινητικής ενέργειας της τύρβης σε θερμότητα πιο δραστικά. Δεν θεωρεί ομοιόμορφο ρυθμό μετατροπής για όλους τους στρόβιλους, άσχετα με το μέγεθός τους, κάτι που το μοντέλο  $k-\varepsilon$  κάνει, αλλά κάποιιοι στρόβιλοι φιλτράρονται και εξαιρούνται από τη διαδικασία αυτή. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και από τα δυο μοντέλα τύρβης τέθηκαν σε σύγκριση με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πλήρους κλίμακας πείραμα ώστε να κριθεί η αξιοπιστία τους.

## 2.5 Οριακές Συνθήκες

Ορίστηκε στην είσοδο της ανεμοσήραγγας το λογαριθμικό προφίλ της ταχύτητας του ανέμου, όπου η ταχύτητα  $V_z$  του ανέμου σε ένα συγκεκριμένο ύψος  $z$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_z = \frac{u_*}{K} \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (12)$$

$z$  : ύψος

$V_z$  : η ταχύτητα σε ύψος  $z$

$u_*$  : ταχύτητα τριβής

$z_0$  : παράμετρος τραχύτητας του εδάφους

$K$  : η σταθερά του von Karman ( $\approx 0.41$ )

Οι οριακές συνθήκες στην είσοδο πρέπει επίσης να παρέχουν τα προφίλ των τυρβωδών χαρακτηριστικών του ανέμου, δηλαδή των  $k$  και  $\varepsilon$ . Οι Richards & Hoxey [43] δείξαν πως τα προφίλ αυτά προκύπτουν από τις εξισώσεις:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (13)$$

και

$$\varepsilon = \frac{u_*^2}{K(z+z_0)} \quad (14)$$

όπου  $C_\mu (= 0.09)$  είναι μια από τις σταθερές του μοντέλου  $k-\varepsilon$ .

Στο κάτω τοίχωμα της ανεμοσήραγγας ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες τοίχου (συνθήκες μη εισχώρησης και μη ολίσθησης). Αυτό σημαίνει πως όλες οι συνιστώσες της ταχύτητας ορίστηκαν ίσες με μηδέν. Εάν η κάλυψη του υπερυψωμένου πλαισίου γινόταν με αδιαπέραστο πλαστικό, τότε συνθήκες τοίχου ορίζονται και για το πλαίσιο. Εάν το υλικό κάλυψης είναι τα γεωργικά δίχτυα τότε δεν υπάρχουν οριακές συνθήκες για το πλαίσιο. Στην έξοδο της ανεμοσήραγγας η πίεση θεωρήθηκε ίση με μηδέν ώστε να προσομοιωθεί η έξοδος του ρευστού από την ανεμοσήραγγα σε μεγαλύτερο (ανοιχτό) χώρο. Τέλος, το άνω τοίχωμα της ανεμοσήραγγας θεωρήθηκε ως ένα λείο σύνορο (δίχως τριβή). Έτσι μόνο η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου (μη εισχώρηση) ορίστηκε ίση με μηδέν.

## 2.6 Προσομοίωση των γεωργικών δικτύων ως περατά υλικά

Τα περατά υλικά (γεωργικά δίχτυα) προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση του *Forcheimer* (Εξίσωση 11). Η εξίσωση αυτή προέρχεται από την εξίσωση:

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{\mu}{K} V + C\rho V^2 \quad (15)$$

Η Εξίσωση 15 παρουσιάζει τη διαφορά πίεσης προσήνεμα και υπήνεμα ενός περατού υλικού πάχους  $\Delta x$  (m). Η παράμετρος  $V$  (m/s) αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ρευστού. Η εξίσωση αυτή είναι ουσιαστικά ίδια με την Εξίσωση 11. Οι δυο παράμετροι  $\alpha$ ,  $\beta$  της Εξίσωσης 11, εξαρτώνται από τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά του περατού υλικού, ενώ περιγράφονται από τους συντελεστές  $K$  και  $C$ , το ιξώδες  $\mu$  ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ), και την πυκνότητα  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) του ρευστού.

$$\beta = \frac{\mu}{K} \Delta x, \quad \alpha = C\rho \Delta x \quad (16)$$

όπου  $K$  ( $m^2$ ) είναι η περατότητα του υλικού και  $C$  ( $m^{-1}$ ) ένας συντελεστής που ονομάζεται συντελεστής μορφής [42]. Ο συντελεστής  $\beta$  γίνεται πιο σημαντικός για χαμηλές τιμές ταχύτητας ενώ ο συντελεστής  $\alpha$  για υψηλές.

Οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  εξαρτώνται από τον τύπο περατού υλικού, γεωργικού δικτυού για την παρούσα μελέτη, και μετρούνται με πειράματα ανεμοσήραγγας [44]. Εν γένει το πάχος των γεωργικών δικτύων είναι αρκετά μικρό, ίσο με  $0.2mm$ . Κατά την προσομοίωση του περατού υλικού με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS, οι παράμετροι  $K$  και  $C$  απαιτούνται από το πρόγραμμα ώστε να περιγραφούν τα χαρακτηριστικά του περατού υλικού. Από τη στιγμή που τα  $\alpha$  και

$\beta$  είναι γνωστά και υποθέτοντας μια τυχαία τιμή του πάχους του περατού υλικού  $\Delta x$ , τα  $K$  και  $C$  μπορούν να υπολογιστούν. Με αυτό τον τρόπο η αριθμητική προσομοίωση του περατού υλικού είναι ανεξάρτητη του πάχους του περατού υλικού  $\Delta x$ .

Δυο γεωργικά δίχτυα εμπορίου, με διακριτικές ονομασίες *WBTAPE* και *SCMD*, χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά κάλυψης του υπερυψωμένου πλαισίου στο πλήρους κλίμακας πείραμα. Ο Πίνακας 8 παρέχει τα χαρακτηριστικά των γεωργικών δικτύων αυτών. Όπως προαναφέρθηκε, οι τιμές των  $\alpha$  και  $\beta$  των δικτύων μετρήθηκαν μέσω πειραμάτων σε ανεμοσήραγα [44].

**Πίνακας 8.** Τα χαρακτηριστικά των γεωργικών δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλήρους κλίμακας πείραμα.

Εμπορική Ονομασία Γεωργικού Δικτυού	Πορώδες (%)	$\alpha$ ( $kg.m^{-3}$ )	$\beta$ ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )
WBTAPE	38	3.0229	0.1179
SCMD	62	0.3637	0.4953

## 2.7 Αποτελέσματα

Βασικός στόχος αυτής της μελέτης ήταν να εκτιμηθεί η μορφή της ροής γύρω από ένα υπερυψωμένο πλαίσιο όταν αυτό είναι καλυμμένο με περατό είτε αδιαπέραστο υλικό. Πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα εξήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν για να εξετασθούν ποσοτικά και ποιοτικά οι διαφορές που προκύπτουν στη μορφή της ροής για τα δυο διαφορετικά είδη κάλυψης του πλαισίου. Σα πρώτο βήμα, η δύναμη που ασκείται από τον άνεμο στο υπερυψωμένο πλαίσιο υπολογίστηκε αριθμητικά και συγκρίνεται με διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα, οποία προκύπτουν από πρόσφατο πλήρους κλίμακας πείραμα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών [23]. Ο συντελεστής δύναμης  $c_f$  ορίζεται στον Ευρωπαϊκό κώδικα σχεδιασμού κατασκευών [21] ως:

$$c_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (17)$$

όπου  $F(N)$  είναι η δύναμη που ασκεί ο άνεμος στο πλαίσιο,  $A(m^2)$  είναι η επιφάνεια του πλαισίου, ενώ ο παρονομαστής αντιστοιχεί στη δυναμική πίεση. Συντελεστές δύναμης του ανέμου  $c_f$  όπως προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση, το πλήρους κλίμακας πείραμα αλλά και όπως παρέχονται από προηγούμενες ερευνητικές μελέτες [18] παρουσιάζονται τον Πίνακα 9.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 9 υποδηλώνουν ότι για υψηλή τιμή πορώδους τα δυο διαφορετικά μοντέλα τύρβης παρέχουν πολύ σύμφωνες τιμές συντελεστή δύναμης. Καθώς η τιμή του πορώδους μειώνεται ασυμφωνίες παρατηρούνται. Το  $k-\epsilon$  RNG μοντέλο τύρβης δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τις μετρήσεις του πλήρους κλίμακας πειράματος για όλες τις περιπτώσεις τιμών πορώδους ενώ το  $k-\epsilon$  μοντέλο δείχνει να υπερεκτιμά την τιμή του συντελεστή δύναμης καθώς το πορώδες γίνεται ολοένα μικρότερο. Σημαντικό είναι

να τονισθεί πως και τα δυο μοντέλα τύρβης επιβεβαιώνουν πως τα φορτία ανέμου μειώνονται καθώς αυξάνεται το πορώδες του υλικού που καλύπτει το υπερυψωμένο πλαίσιο.

**Πίνακας 9.** Σύγκριση συντελεστών ανέμου ( $c_f$ ) του υπερυψωμένου πλαισίου από διάφορες πηγές.

Πορώδες ( $p$ )	Μέσος Συντελεστής δύναμης $c_f$			Letchford [18] Πείραμα σε ανεμοσήραγγα
	Πλήρους κλίμακας πείραμα [23]	3D αριθμητική προσομοίωση [24]		
		$k-\varepsilon$ RNG	$k-\varepsilon$	
0% (FILM)	1.40	1.40	1.67	1.47
38% (WBTAPE)	1.10	1.06	1.30	-
62% (SCMD)	0.60	0.61	0.65	-

Η μικρή ερευνητική δραστηριότητα σε προβλήματα σχετικά με υπερυψωμένα πλαίσια καθιστά μόνο αποτελέσματα του Letchford [18] να είναι δυνατό να τεθούν υπό σύγκριση. Δυστυχώς για τις υπό εξέταση περατότητες δεν υπάρχουν αντίστοιχα αποτελέσματα από την μελέτη αυτή [18]. Για το αδιαπέραστο υπερυψωμένο πλαίσιο ο συντελεστής πίεσης που υπολογίζει ο Letchford [18] βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με το πλήρους κλίμακας πείραμα όσο και με την αριθμητική προσομοίωση που κάνει χρήση του  $k-\varepsilon$  RNG μοντέλου τύρβης.

### 2.7.1 Αποτελέσματα ταχυτήτων ανέμου

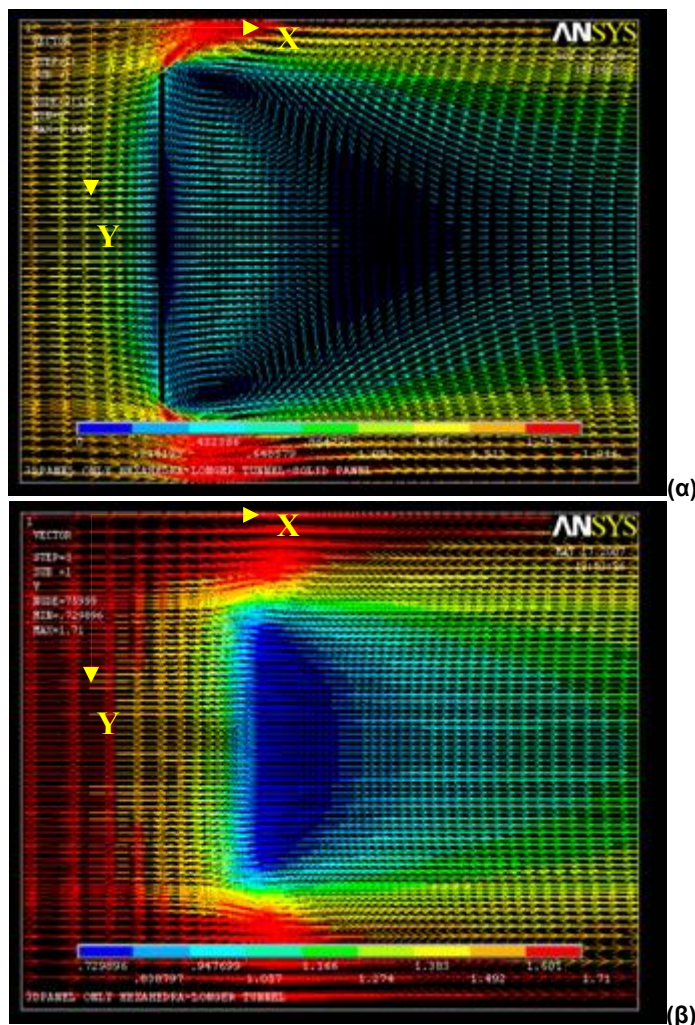
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της αριθμητικής μεθόδου, όσο αφορά στην έρευνα της αλληλεπίδρασης ανέμου – κατασκευής, είναι ότι επιτρέπει την λεπτομερή ανάλυση της προκύπτουσας ροής. Τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής όπως η δημιουργία στροβίλων, η αποκόλληση της ροής μπορούν εξετασθούν και να αναλυθούν ποσοτικά αλλά με τη βοήθεια απεικονίσεων μεγεθών είτε ως πεδία διανυσμάτων είτε ως ισοϋψείς καμπύλες (contours). Τα αριθμητικά αποτελέσματα μπορούν να ελεγχθούν, όσο αφορά την αξιοπιστία τους, με συγκρίσεις μετρούμενων τιμών ταχυτήτων σε συγκεκριμένα σημεία γύρω από την κατασκευή στο πλήρους κλίμακας πείραμα.

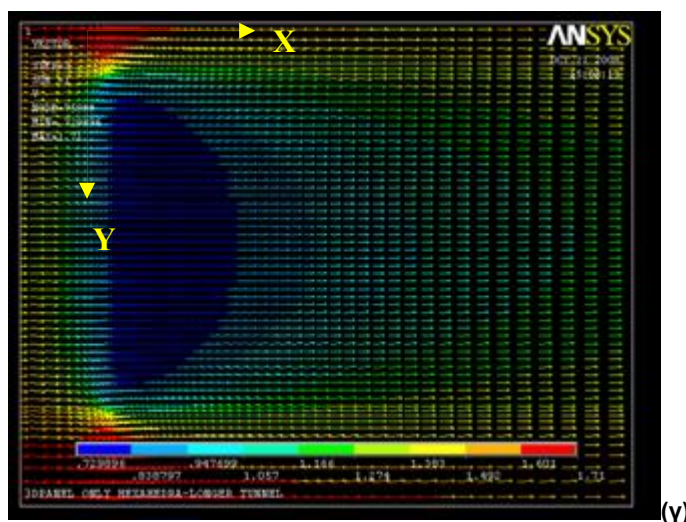
Η ταχύτητα του ανέμου μετρήθηκε σε εννιά διαφορετικά σημεία γύρω από το υπερυψωμένο πλαίσιο στον πλήρους κλίμακας πείραμα και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αριθμητικά αποτελέσματα που τα μοντέλα τύρβης  $k-\varepsilon$  και  $k-\varepsilon$  RNG παρείχαν. Επιπρόσθετα, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου εξετάστηκαν με τη βοήθεια της αριθμητικής μεθόδου.

Αναλυτικά, η μορφή του πεδίου ροής γύρω από το πλαίσιο παρουσιάζεται στην *Εικόνα 18*. Η συγκεκριμένη εικόνα αποτελεί μια τομή σε σταθερή θέση του ύψους  $z$  ( $z$ -επίπεδο ή  $x$ - $y$  επίπεδο), η οποία είναι στα μισά του ύψους του πλαισίου, δηλαδή σε ύψος  $4m$  από το έδαφος. Το πεδίο ροής παρουσιάζεται με τη βοήθεια διανυσμάτων ταχύτητας, όπως υπολογίστηκαν από την αριθμητική προσομοίωση, για κάθε κόμβο

του πλέγματος. Η *Εικόνα 18α*, αντιστοιχεί σε αδιαπέραστη κάλυψη του πλαισίου (πλαστικό) ενώ οι άλλες δυο στην κάλυψη με τα περατά δίχτυα *WBTAPE* και *SCMD* αντίστοιχα. Οι εικόνες αυτές παρουσιάζουν πολύ ευδιάκριτα την απόσβεση των στροβίλων στο υπερυψωμένο πλαίσιο. Η ροή στην περίπτωση της αδιαπέραστης κάλυψης (*Εικόνα 18α*) αναδεικνύει τη δημιουργία στροβίλων στα ελεύθερα άκρα του υπερυψωμένου πλαισίου. Τα σημεία αυτά είναι εξάλλου και τα σημεία εμφάνισης έντονων τυρβωδών φαινομένων. Η ροή του ανέμου στην περίπτωση των περατών υλικών κάλυψης (*Εικόνα 18β και 18γ*) δεν παρουσιάζει στροβίλους με άμεσο συμπέρασμα της ύπαρξης σαφώς μειωμένων τυρβωδών φαινομένων συγκριτικά με την αδιαπέραστη κάλυψη. Η περατή κάλυψη επιτρέπει τη ροή του ανέμου να διέρχεται του υπερυψωμένου πλαισίου (bleed flow) με συνέπεια να αποσβένονται οι στροβίλοι που δημιουργούνται στα ελεύθερα άκρα του.

Η ανωτέρω ποιοτική ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, όπως παρατηρήθηκαν στην *Εικόνα 18*, επιβεβαιώνεται ποσοτικά από τα πειραματικά δεδομένα. Ο *Πίνακας 10* και η *Εικόνα 19* παρουσιάζουν ποσοτικά τα χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου γύρω από το υπερυψωμένο πλαίσιο, για τις τρεις περιπτώσεις κάλυψης. Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν τρεις τύποι αποτελεσμάτων. Τα πειραματικά πλήρους κλίμακας αποτελέσματα και τα αριθμητικά για τα δυο διαφορετικά μοντέλα τύρβης *k-ε* και *k-ε RNG*. Οι μέσες τιμές των ταχυτήτων έχουν κανονικοποιηθεί με την τιμή της ταχύτητας του ανεμομέτρου αναφοράς (ανεμόμετρο στη θέση 1 – *Εικόνα 11*)





**Εικόνα 18.** Τομή κατά το  $x$ - $y$  επίπεδο του πεδίου ροής των ταχυτήτων στα μισά του ύψους του υπερυψωμένου πλαισίου: (α) κάλυψη αδιαπέραστου πλαστικού, (β) κάλυψη διχτυού – WBTAPE, (γ) κάλυψη διχτυού – SCMD.

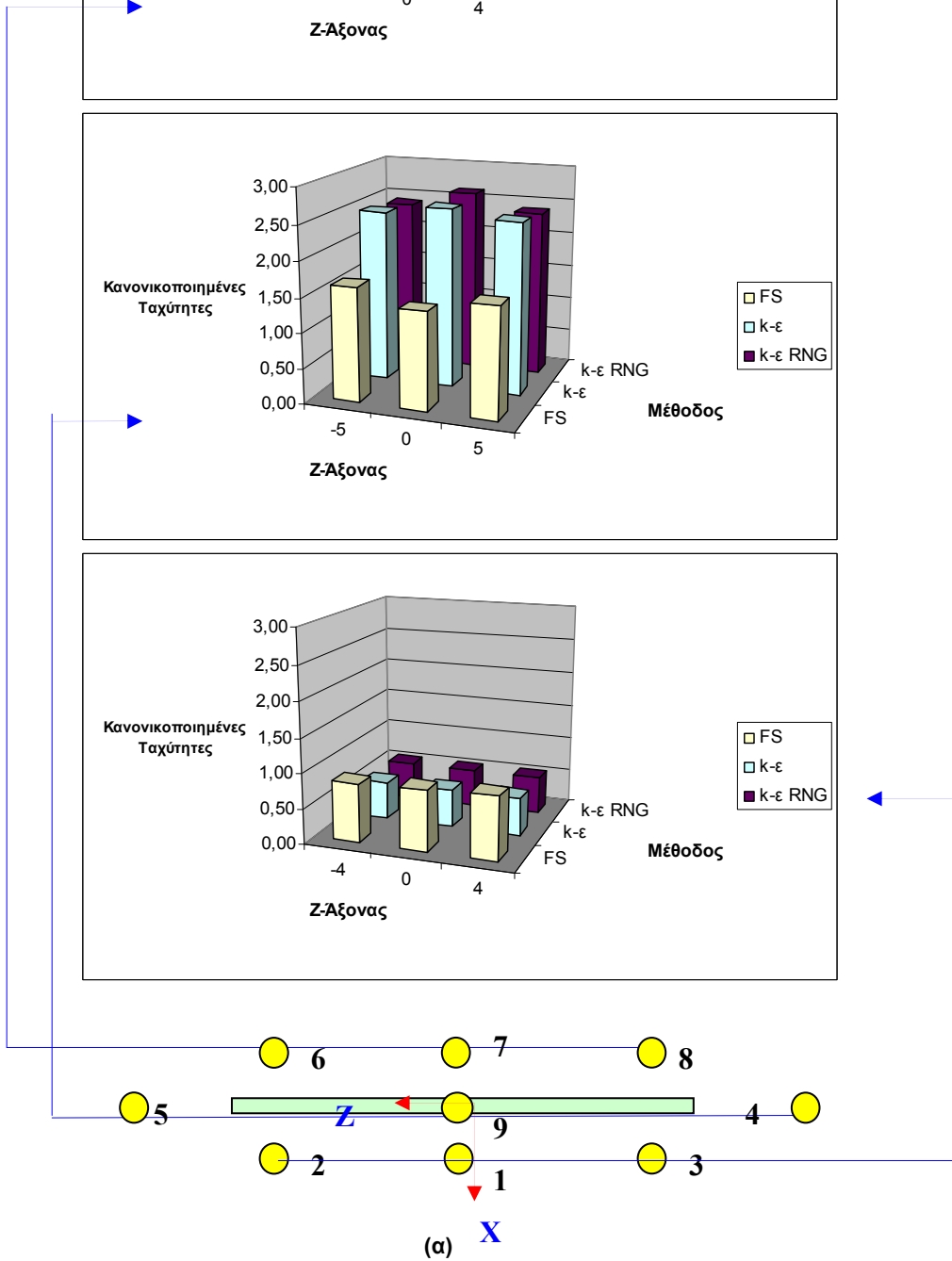
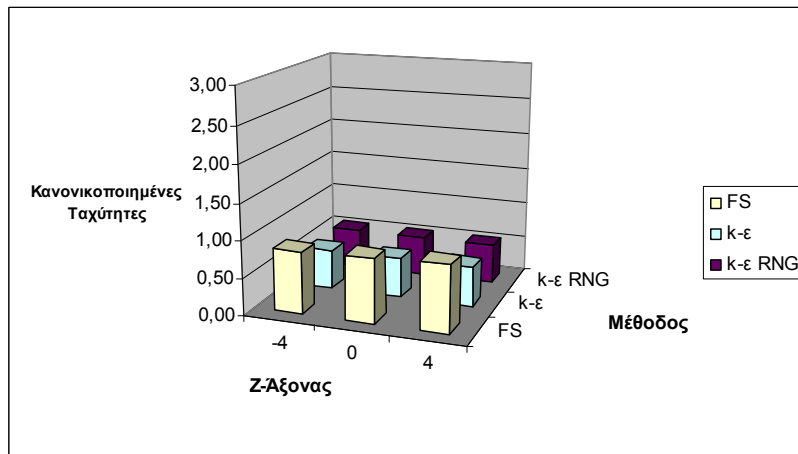
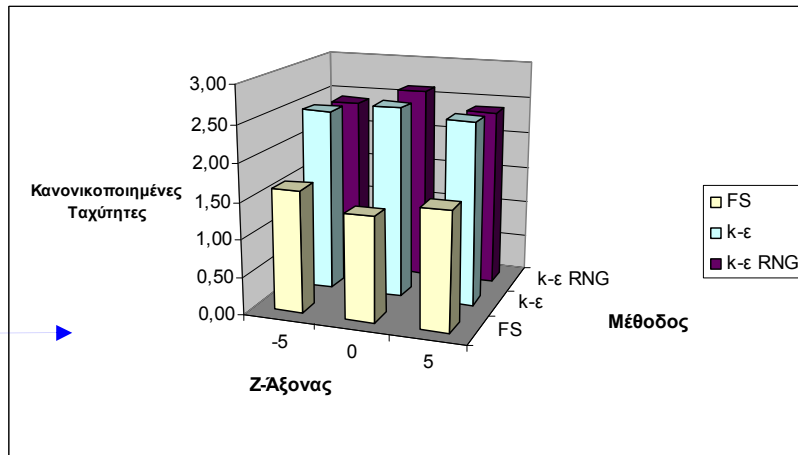
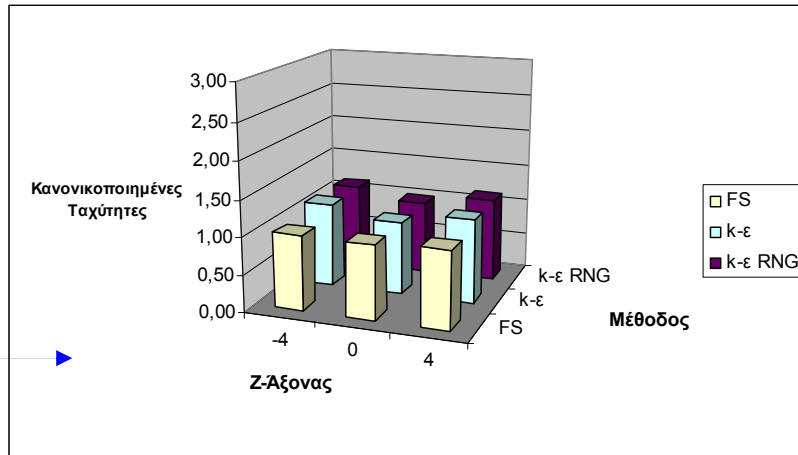
Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 10 και στις Εικόνες 19β και 19γ, οι κανονικοποιημένες ταχύτητες ανέμου στις θέσεις 1, 2, 3 στην προσήνεμη πλευρά του πλαισίου είναι σχεδόν ίσες με τη μονάδα και για τις δυο περιπτώσεις περατής κάλυψης. Στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου, στις θέσεις 6, 7, 8 οι ταχύτητες είναι μικρότερες της μονάδας, υποδηλώνοντας την προστατευτική ιδιότητα του πλαισίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου, τα πλαϊνά (θέσεις 4, 5) και άνω (θέση 9) οι κανονικοποιημένες ταχύτητες είναι αυξημένες, μεγαλύτερες της μονάδας, καθώς ο άνεμος επιταχύνεται στις θέσεις αυτές. Για κάλυψη περατού υλικού και για αύξηση της τιμής του πορώδους η επιτάχυνση αυτή γίνεται αμελητέα όπως φαίνεται στην Εικόνα 19β. Η μείωση της επιτάχυνσης οφείλεται στην ιδιότητα των περατών υλικών να επιτρέπουν στην ροή να διαπερνά από το εσωτερικό τους.

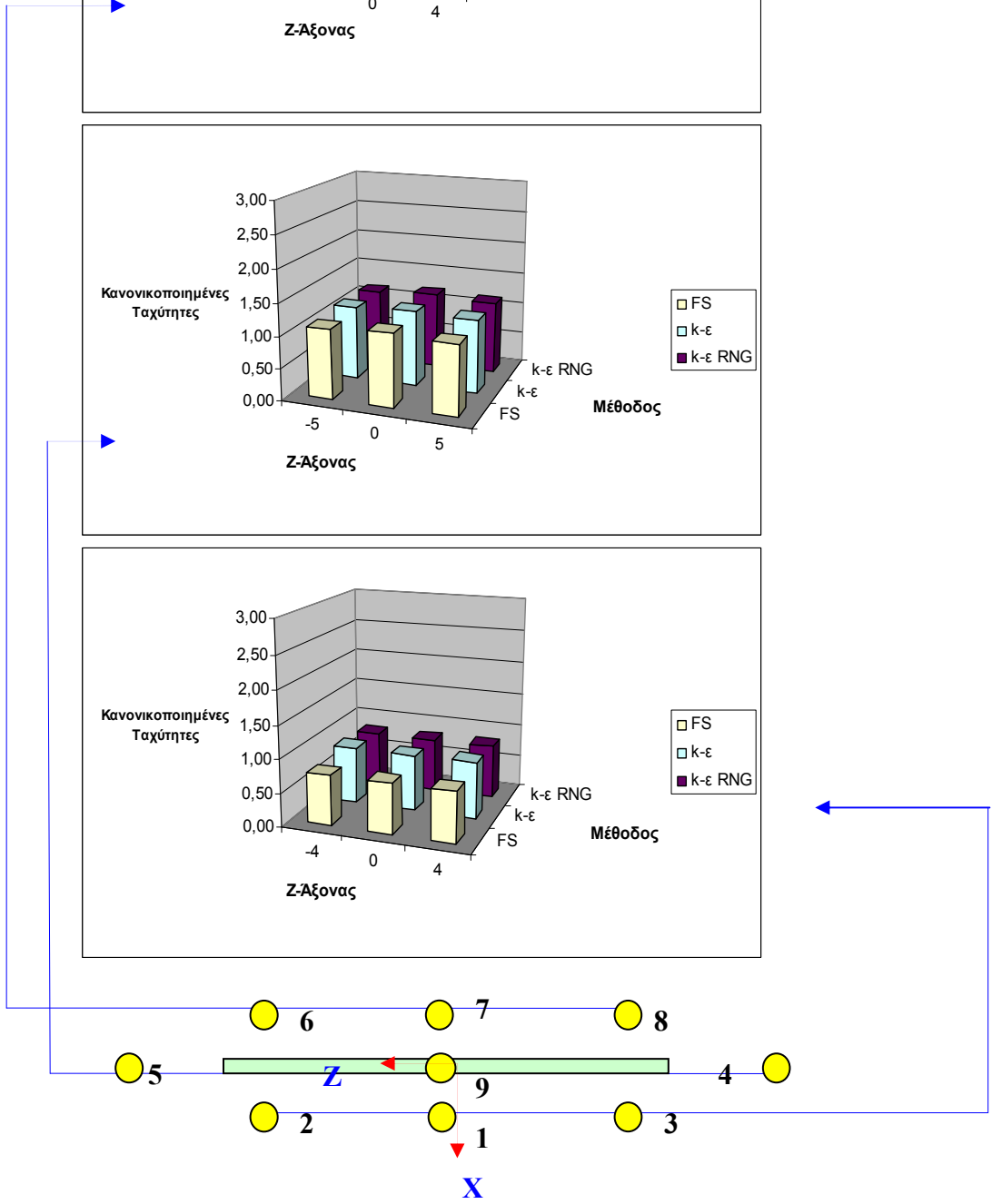
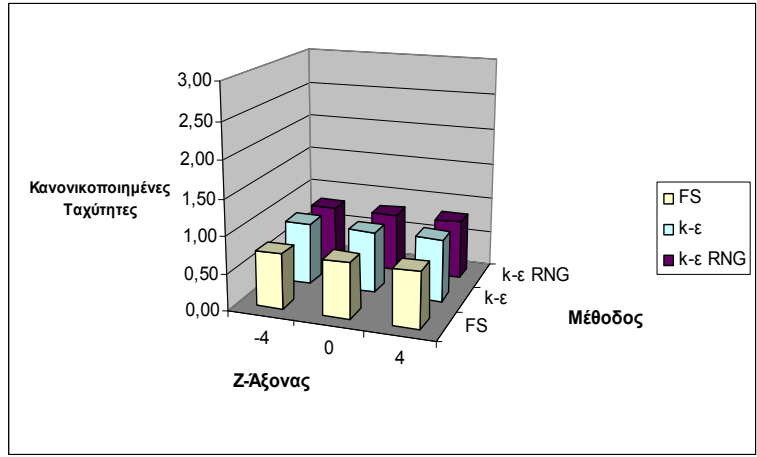
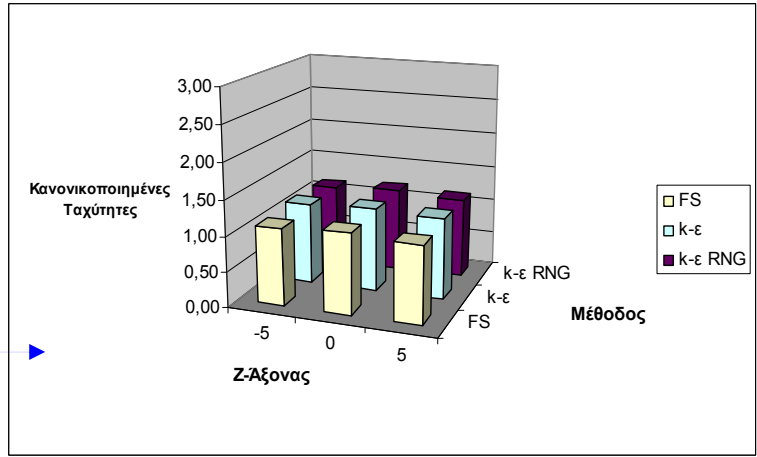
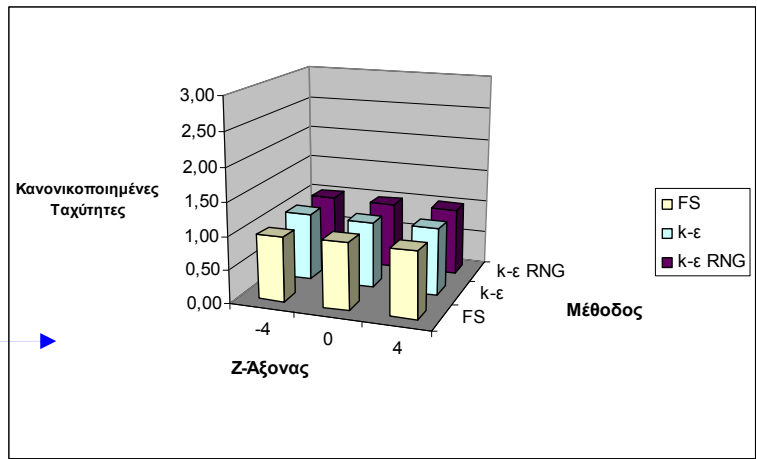
Γενικά, αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν συμφωνία στην περίπτωση της περατής κάλυψης. Η διαφορά στα αποτελέσματα δεν ξεπερνά σε καμιά περίπτωση το ποσοστό του 10% και είναι εντονότερη στις υπήνεμες θέσεις 6 και 8. Στις θέσεις 4, 5 και 9 οι αριθμητικές τιμές συμφωνούν με τις πειραματικές μετρήσεις. Οι ταχύτητες του ανέμου στις θέσεις όπου μετρήθηκαν στο πλήρους κλίμακας πείραμα, αναπαράγονται σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό από την αριθμητική προσομοίωση, αποδεικνύοντας ότι η μορφή του πεδίου ροής είναι αυτή που παρουσιάστηκε από την αριθμητική προσομοίωση στις Εικόνες 18β και 18γ. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία της αριθμητικής προσομοίωσης για την μελέτη της συμπεριφοράς περατών πλαισίων. Η αεροδυναμική συμπεριφορά των περατής κάλυψης πλαισίων μπορεί να μελετηθεί και να αναλυθεί με ακρίβεια με τη βοήθεια υπολογιστικής προσομοίωσης.

Η Εικόνα 19α και ο Πίνακας 10 δίνουν αποτελέσματα και για την αδιαπέραστη κάλυψη πλαστικού. Η αριθμητική προσομοίωση στις θέσεις 2 και 3 δίνει ελαφρώς αυξημένες τιμές ταχύτητας (1.14), όχι ίσες με την τιμή του ανεμομέτρου αναφοράς όπως μετρήθηκε από το πλήρους κλίμακας πείραμα. Η αδιαπέραστη κάλυψη, μην επιτρέποντας στη ροή να διέρχεται του πλαισίου, προκαλεί επιτάχυνση του ανέμου πριν την αποκόλληση της ροής στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου. Η επιτάχυνση αυτή φαίνεται να αναπαράγεται από την αριθμητική προσομοίωση και σε μια περιοχή πριν την περιοχή αποκόλλησης της ροής. Αποτελέσματα των υπήνεμων ανεμομέτρων (θέσεις 6, 7, 8) από την αριθμητική προσομοίωση αλλά και το πλήρους κλίμακας

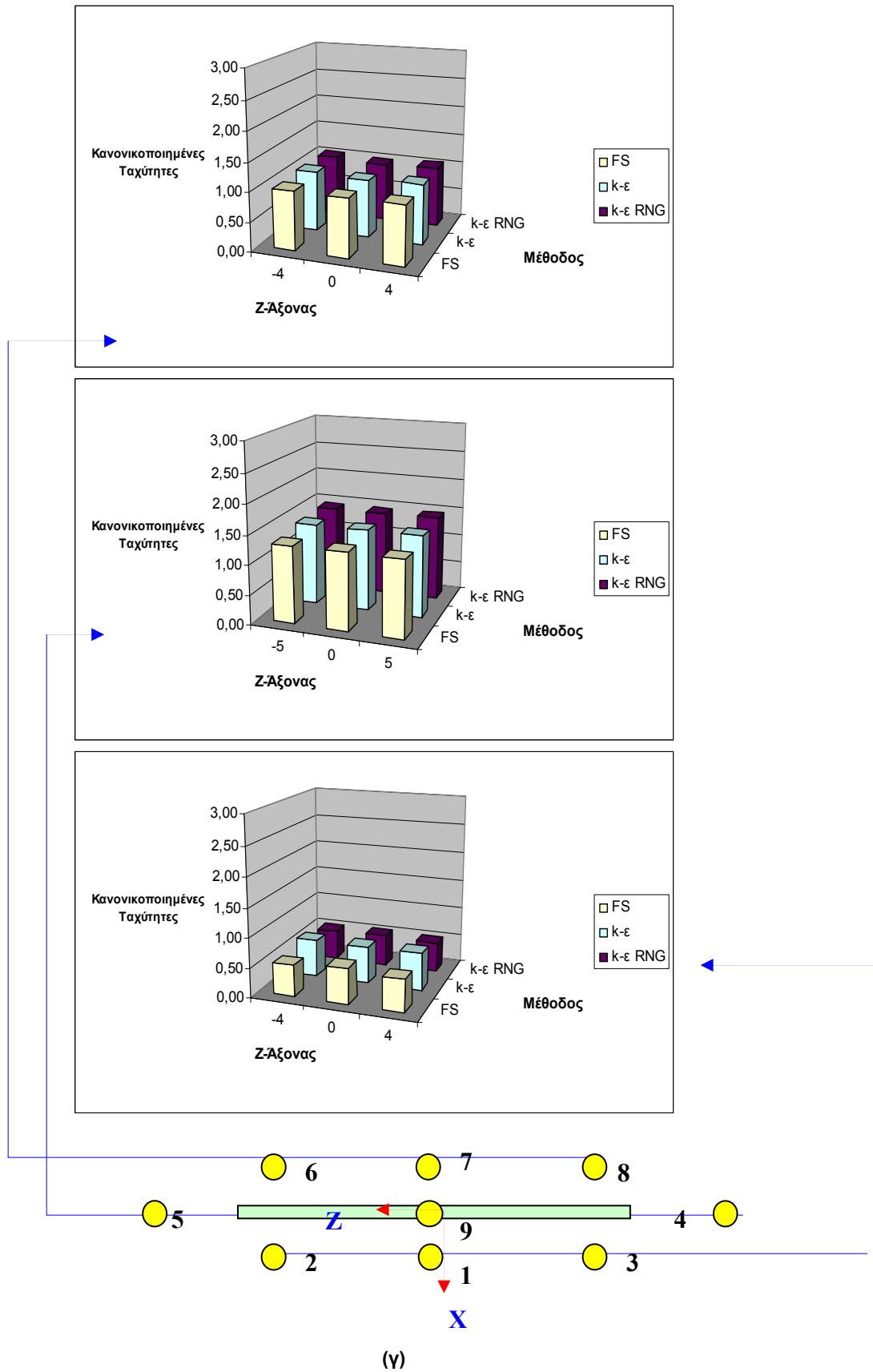


πείραμα είναι ενδεικτικά της προστατευτικής ιδιότητας του πλαισίου (shelter effect). Συγκρίνοντας τα δυο ειδών αποτελέσματα διακρίνεται σημαντική ασυμφωνία. Παρατηρούνται διαφορές κοντά στο 25% ανάμεσα στα πλήρους κλίμακας αποτελέσματα και σε αυτά της αριθμητικής προσομοίωσης. Για τις θέσεις 4, 5, και 9 ακόμη εντονότερες ασυμφωνίες προκύπτουν. Όπως παρατηρείται στον *Πίνακα 10*, τα αριθμητικά αποτελέσματα δίνουν πολύ υψηλές τιμές ταχύτητας σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Οι θέσεις αυτές είναι εντός των περιοχών όπου προκύπτει η αποκόλληση της ροής (στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου) και ισχυροί στρόβιλοι εμφανίζονται, περιοχές δηλαδή έντονων τυρβωδών φαινομένων. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την αδυναμία των μοντέλων  $k-\epsilon$  και  $k-\epsilon$  RNG να αναπαράγουν σωστά ροές γύρω από αδιαπέραστα εμπόδια [41].





(β)



**Εικόνα 19.** Κανονικοποιημένες μέσες τιμές ταχυτήτων σε διάφορες θέσεις γύρω από το υπερυψωμένο πλαίσιο σε ύψος ίσο με το μισό του πλαισίου: α) Αδιαπέραστη κάλυψη πλαστικού, β) Κάλυψη δικτυού - SCMD, γ) Κάλυψη δικτυού -WBTAPE

**Πίνακας 10.** Μέσες τιμές ταχυτήτων ανέμου κανονικοποιημένες με την τιμή του ανεμομέτρου αναφοράς για διάφορες θέσεις γύρω από το υπερυψωμένο πλαίσιο. Όλες οι περιπτώσεις κάλυψης.

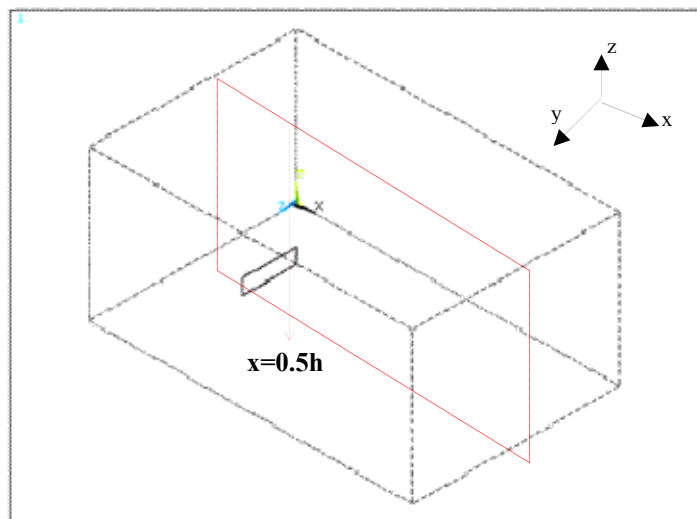
Θέσεις Ανεμομέτρων	Κάλυψη πλαisiού /Θέσεις ανεμομέτρων	Αδιαπέραστο πλαστικό			Περατό δίχτυ (SCMD)			Περατό δίχτυ (WBTAPE)		
		FS	κ-ε	RNG	FS	κ-ε	RNG	FS	κ-ε	RNG
Προσήνεμα	2	1.02	1.14	1.14	0.97	1.02	1.02	1.01	1.04	1.04
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	3	1.05	1.14	1.14	1.00	1.02	1.02	1.01	1.04	1.04
Επίπεδο πλαisiού	5	1.64	2.47	2.40	1.09	1.15	1.14	1.31	1.40	1.44
	9	1.40	2.58	2.62	1.14	1.18	1.19	1.31	1.4	1.44
	4	1.59	2.47	2.40	1.09	1.15	1.14	1.30	1.40	1.45
Υπήνεμα	6	0.84	0.55	0.54	0.75	0.86	0.81	0.53	0.64	0.51
	7	0.87	0.55	0.54	0.75	0.85	0.81	0.6	0.64	0.54
	8	0.91	0.55	0.54	0.76	0.86	0.81	0.55	0.64	0.51

Εν γένει, η ποιότητα των αριθμητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην *Εικόνα 19*, δεν εξαρτάται από το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε. Παρόλο που και τα δυο μοντέλα τύρβης παρέχουν τη μορφή του πεδίου ροής πολύ ικανοποιητικά (και για περατό αλλά και αδιαπέραστο πλαίσιο), σε ποσοτικό επίπεδο, για την αδιαπέραστη κάλυψη, οι τιμές ταχύτητας που δίνει η αριθμητική προσομοίωση απέχει αρκετά από τις πλήρους κλίμακας πειραματικές μετρήσεις.

### 2.7.2 Χρήση της αριθμητικής προσομοίωσης για την ανάλυση της υπήνεμης ροής.

Από τη στιγμή που η αριθμητική προσομοίωση κρίθηκε αξιόπιστη για την περίπτωση της περατής κάλυψης του υπερυψωμένου πλαisiού, το υπολογιστικό μοντέλο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω ανάλυση της ροής γύρω από μια τέτοιου είδους κατασκευή. Επιπρόσθετη ανάλυση της ροής παρουσιάζεται και για την αδιαπέραστη κάλυψη. Παρά το γεγονός πως τα ποσοτικά αποτελέσματα, σχετικά με τις μέσες ταχύτητες, για τη συγκεκριμένη περίπτωση δεν ήταν ικανοποιητικά, η αριθμητική προσομοίωση αναπαρήγαγε ποιοτικά με πολύ καλό τρόπο τη μορφή της ροής γύρω από το αδιαπέραστο υπερυψωμένο πλαίσιο (*Εικόνα 18α*). Η ακόλουθη ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων θα στηρίξει τα συμπεράσματα αυτά.

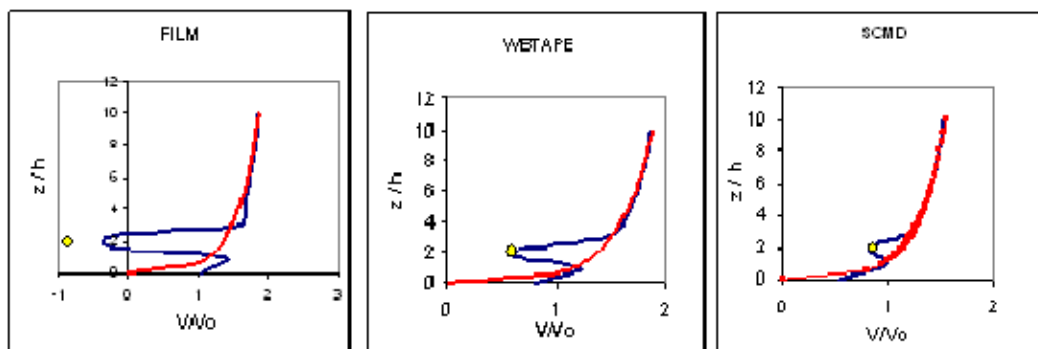
Αρχικά, η προστατευτική ιδιότητα (shelter effect) σε μια κάθετη τομή κατά ένα  $y$ -επίπεδο (είτε  $x$ - $z$  επίπεδο, *Εικόνα 20*), συγκεκριμένα στα μισά του πλάτους του πλαisiού, μελετήθηκε. Εξήχθησαν αριθμητικά οι ταχύτητες καθ' ύψος της ανεμοσήραγγας σε μια απόσταση ίση με  $x=0.5h$  στην υπήνεμη πλευρά του πλαisiού (υποθέτουμε πως το πλαίσιο βρίσκεται σε θέση  $x=0$ )



**Εικόνα 20.** Το  $x$ - $z$  επίπεδο και η θέση  $x=0.5h$  όπου υπολογίστηκαν αριθμητικά οι ταχύτητες για όλο το ύψος της ανεμοσήραγγας.

Η *Εικόνα 21* δίνει το προφίλ της  $x$ -συνιστώσας της ταχύτητας για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κάλυψης που μελετήθηκαν. Οι τιμές των ταχυτήτων έχουν κανονικοποιηθεί με την ταχύτητα που αντιστοιχεί στη θέση όπου το ανεμόμετρο αναφοράς ήταν τοποθετημένο, δηλαδή στα μισά του ύψους του πλαισίου ( $z=2h=4m$ ), στα μισά του πλάτους του πλαισίου και σε  $x=0.5h$  προσήνεμα του πλαισίου (το πλαίσιο βρίσκεται στο  $x=0$ ). Το ύψος  $z$  έχει κανονικοποιηθεί με το ύψος του πλαισίου  $h=2m$ . Σε θέση μακριά και προσήνεμα του πλαισίου ο άνεμος ακολουθεί το λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας (η κόκκινη γραμμή σε κάθε διάγραμμα). Η προστατευτική ικανότητα του πλαισίου εξαρτάται από την τιμή του πορώδους του υλικού κάλυψης κάθε περίπτωσης.

Αποτελέσματα του πλήρους κλίμακας πειράματος είναι ενσωματωμένα στα διαγράμματα της *Εικόνας 21*. Για τα συγκεκριμένα διαγράμματα μόνο ένα πειραματικό αποτέλεσμα μπορεί να συμπεριληφθεί. Η μέτρηση αυτή έχει τονισθεί με ένα κύκλο ώστε να είναι ευδιάκριτη. Για τις δυο διαφορετικές περιπτώσεις περατής κάλυψης (τα δυο διαφορετικά γεωργικά δίχτυα) η αριθμητική προσομοίωση και το πείραμα βρίσκονται σε συμφωνία, όπως τονίσθηκε και πρωτύτερα. Για την περίπτωση της αδιαπέραστης κάλυψης είναι εμφανής η ασυμφωνία του πειράματος με την υπολογιστική προσομοίωση. Τα αριθμητικά αποτελέσματα ισχυροποιούν την άποψη ότι η ποιοτική μορφή του πεδίου της ροής αναπαράγεται σωστά. Αρνητικές ταχύτητες παρατηρούνται αναδεικνύοντας την ύπαρξη στροβίλων και υποδηλώνοντας την ύπαρξη τυρβωδών φαινομένων. Παρόλα αυτά, είναι προφανές πως η ποσοτική πρόβλεψη των τυρβωδών αυτών φαινομένων δεν είναι εφικτό να επιτευχθεί, όπως φαίνεται και από την *Εικόνα 21*.



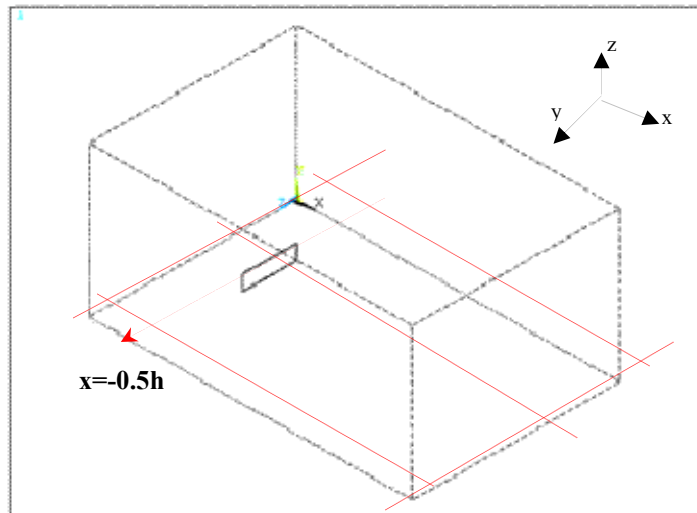
**Εικόνα 21.** Χ-συνιστώσα της ταχύτητας (κατά τη διεύθυνση του ανέμου) σε ένα  $x$ - $z$  επίπεδο και σε θέση  $x=0.5h$  στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου, για κάθε περίπτωση διαφορετικής κάλυψης του πλαισίου. Αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα.

Γεωργικά δίχτυα μικρότερης τιμής πορώδους προκαλούν μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Και τα δυο υπό μελέτη γεωργικά δίχτυα είναι σχετικά υψηλής τιμής πορώδους (62% για το SCMD και 38% για το WBTAPE). Όπως αναφέρθηκε και στη διεθνή βιβλιογραφία [29, 30, 31, 35, 38] για περατότητες μεγαλύτερες του 30% δεν υπάρχει η δημιουργία στροβίλων υπήνεμα του πλαισίου. Για να αποφευχθούν συγχύσεις πρέπει να αναφερθεί εδώ παρότι οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  είναι αυτές που χαρακτηρίζουν την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός περατού υλικού (Εξίσωση 13) σχετίζονται άμεσα με την τιμή του πορώδους του υλικού, Συμπεριλαμβάνουν όμως περισσότερες πληροφορίες για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.

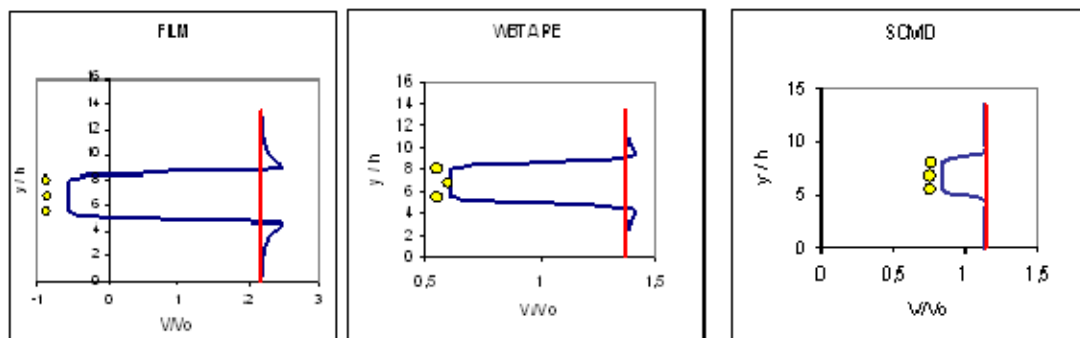
Η Εικόνα 23, παρουσιάζει το προφίλ της ταχύτητας σε οριζόντια τομή κατά το  $x$ - $y$  επίπεδο, στα μισά του ύψους του πλαισίου και σε θέση  $x=0.5h$  στην προσήνεμη περιοχή του, δηλαδή  $x=-0.5h$  (Εικόνα 22). Οι ταχύτητες και το πλάτος του πλαισίου έχουν κανονικοποιηθεί ακριβώς όπως και για τα διαγράμματα της Εικόνας 23. Κι εδώ εμπεριέχονται πειραματικές μετρήσεις οι οποίες και πάλι βρίσκονται στο εσωτερικό διακριτικών κύκλων. Σε αυτού του τύπου την ανάλυση μπορούν να συμπεριληφθούν τρεις πλήρους κλίμακας μετρήσεις.

Στην τομή κατά αυτό το επίπεδο μπορούν όπως και πριν να παρατηρηθούν οι αρνητικές τιμές στις ταχύτητες, για την περίπτωση αδιαπέραστης κάλυψης, ενδεικτικό της ύπαρξης στροβίλων μετά την αποκόλληση της ροής στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου. Το συμπέρασμα και σε αυτή τη μορφή ανάλυσης των αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι ότι αναπαράγονται και πάλι τα τυρβώδη φαινόμενα αλλά το μέγεθός τους είναι σε ασυμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Η μελέτη της δημιουργίας στροβίλων στην υπήνεμη περιοχή μιας τέτοιας κατασκευής είναι ιδιαίτερης σημασίας, όσο αφορά το σχεδιασμό της κατασκευής, διότι η ύπαρξή τους επιφέρει την υψηλά και επικίνδυνα φορτία στις περιοχές κοντά στα ελεύθερα άκρα όπου και σχηματίζονται.

Για τις περιπτώσεις περατής κάλυψης με γεωργικά δίχτυα, οι πειραματικές μετρήσεις και τα αριθμητικά αποτελέσματα συμφωνούν, όπως αποκαλύπτει και η Εικόνα 23. Επίσης το λιγότερο περατό πλαίσιο παρέχει όπως και πριν καλύτερη υπήνεμη προστασία, όσο αφορά την μείωση των ταχυτήτων αλλά προκαλεί μεγαλύτερης έντασης τυρβώδη χαρακτηριστικά.



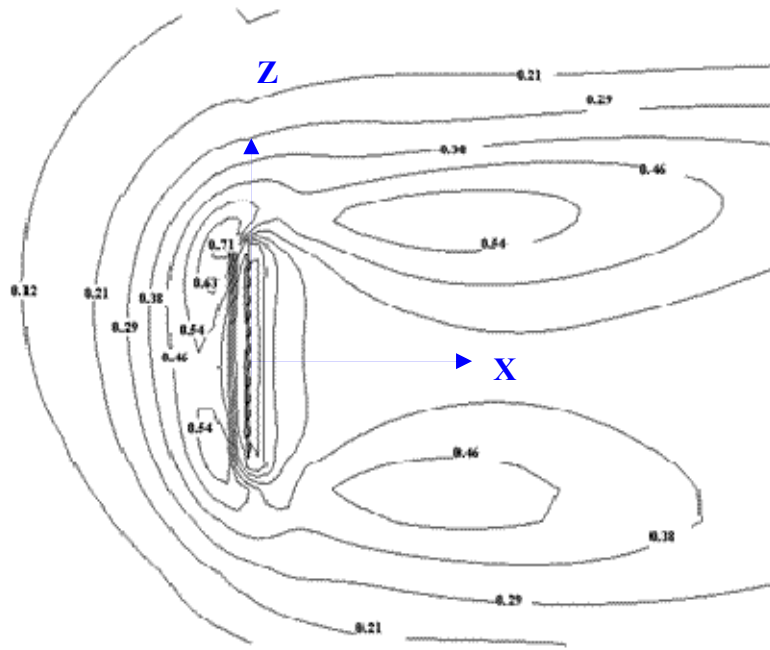
**Εικόνα 22.** Το  $x$ - $y$  επίπεδο και η θέση  $x=-0.5h$  όπου υπολογίστηκαν αριθμητικά οι ταχύτητες για όλο το πλάτος της ανεμοσήραγγας.



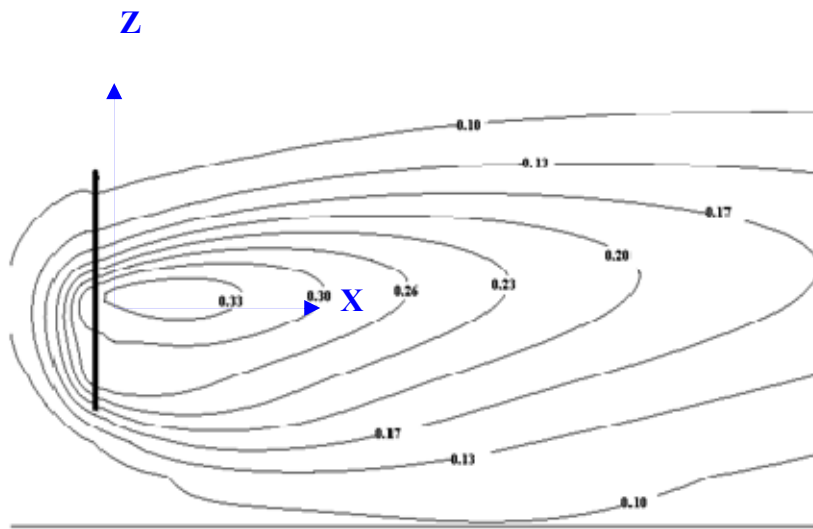
**Εικόνα 23.**  $X$ -συνιστώσα της ταχύτητας (κατά τη διεύθυνση του ανέμου) σε ένα  $x$ - $y$  επίπεδο και σε θέση  $x=-0.5h$  στην προσήνεμη περιοχή του πλαισίου, για κάθε περίπτωση διαφορετικής κάλυψης του πλαισίου. Αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα.

Περαιτέρω αποτελέσματα που εξήχθησαν από την αριθμητική προσομοίωση δείχνουν για την περίπτωση της αδιαπέραστης κάλυψης με πλαστικό, την κινητική ενέργεια της τύρβης (Εικόνα 24) να αποκτά μέγιστη τιμή στη θέση κοντά στα ελεύθερα άκρα του πλαισίου και συγκεκριμένα εκεί που αρχίζει η αποκόλληση της ροής, με τιμή ίση με  $0.71 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Στις θέσεις όπου δημιουργούνται οι στρόβιλοι οι τιμές της κινητικής ενέργειας της τύρβης κυμαίνονται μεταξύ  $0.46-0.54 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Για τις περιπτώσεις όπου υπάρχει περατή κάλυψη, η ανάλυση της αριθμητική προσομοίωση δίνει τις υψηλότερες τιμές της ποσότητας αυτής γενικά στο σύνολο της κοντινής στο πλαίσιο υπήνεμης περιοχής. Οι μέγιστες τιμές της κινητικής ενέργειας της τύρβης στις δυο αυτές περιπτώσεις είναι σημαντικά μικρότερες από την περίπτωση του αδιαπέραστου πλαισίου και είναι ίσες με  $0.33 \text{ m}^2/\text{s}^2$  για το δίχτυ *WBTape* ενώ  $0.14 \text{ m}^2/\text{s}^2$  για το μεγαλύτερης τιμής πορώδους *SCMD*. Η ανάλυση αποτελεσμάτων της κινητικής ενέργειας της τύρβης αποτελεί ένα ακόμη στοιχείο της ύπαρξης πιο ομαλής ροής και της απουσίας έντονων τυρβωδών φαινομένων υπήνεμα για την περίπτωση των περατών πλαισίων.

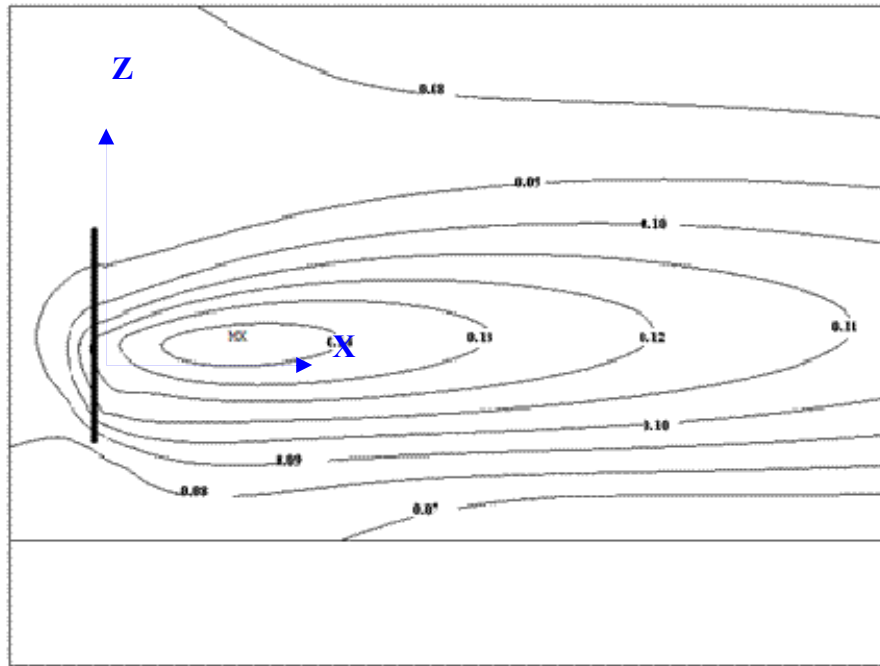




(α)



(β)



(γ)

**Εικόνα 24.** Ισοϋψείς καμπύλες της κινητικής ενέργειας της τύρβης για τις τρεις περιπτώσεις κάλυψης και για τομή που αντιστοιχεί στην *Εικόνα 20*: α) Αδιαπέραστη κάλυψη πλαστικού, β) κάλυψη διχτυού – *WBTAPE*, γ) κάλυψη διχτυού – *SCMD*

### **3. Πλήρους κλίμακας πείραμα και δυσδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των φορτίων ανέμου σε ένα κατακόρυφο πλαίσιο, περατής ή μη κάλυψης, με ελαστική στήριξη.**

Όπως έχει προαναφερθεί, στη βιβλιογραφία υπάρχει εκτενής μελέτη των ανεμοφρακτών που βρίσκονται τοποθετημένοι στο έδαφος. Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες που αφορούν τις μέσες πιέσεις (mean pressures) όπως επίσης μελέτες που αφορούν τις μέγιστες στιγμιαίες τιμές πίεσης ανέμου σε ένα ανεμοφράκτη (peak pressures) [10]. Έχει γίνει λεπτομερής ανάλυση σχετικά με τα τμήματα ενός ανεμοφράκτη που δέχονται τα μεγαλύτερα φορτία [7, 11] και εμφανίζουν υψηλότερα ποσοστά αστοχίας όπως και για τα τμήματα στα οποία η πίεση του προσπίπτοντα ανέμου είναι σταθερή. Έχουν μελετηθεί ακόμη οι αλλαγές που προκαλούνται στα φορτία που ασκούνται σε ένα ανεμοφράκτη με την μεταβολή των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών [5, 9]. Πραγματοποιήθηκαν επίσης αριθμητικές προσομοιώσεις για να διαπιστωθεί κατά πόσο τα διάφορα μοντέλα προσομοίωσης CFD είναι αποδοτικά και αξιόπιστα [6, 8] μετά από σύγκριση με αποτελέσματα πειραμάτων πλήρους κλίμακας.

Περατοί ανεμοφράκτες έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης λόγω της εξομάλυνσης των τυρβωδών φαινομένων που προκαλούν [14, 17, 31, 37]. Συγκρίσεις για την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των περατών ανεμοφρακτών έχουν επίσης πραγματοποιηθεί [30].

Όλες οι παραπάνω μελέτες αφορούν αποκλειστικά και μόνο σε ανεμοφράκτες οι οποίοι είναι κάθετοι στο επίπεδο του εδάφους. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα έρευνας που προήλθαν από πλήρους κλίμακας πειράματα αλλά και δυσδιάστατη αριθμητική προσομοίωση πλαισίου, το οποίο καλύπτεται είτε από αδιαπέραστο πλαστικό είτε από περατό γεωργικό δίχτυ. Το πλαίσιο στηρίζεται ελαστικά σε κάποιο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους ενώ στηρίζεται με άρθρωση στη βάση του, έτσι ώστε να επιτρέπεται η στροφή του περί την βάση ανάλογα με την ένταση του ανέμου. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης συγκρίνονται και συσχετίζονται με τα αποτελέσματα πειράματος πλήρους κλίμακας.

Τα πλήρους κλίμακας πειράματα πραγματοποιήθηκαν στον πειραματικό αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η λειτουργία της ελαστικής στήριξης βασίστηκε στη χρήση ελατηρίων συγκεκριμένης ελαστικής σταθεράς της οποίας η τιμή είχε καθοριστεί σύμφωνα με τις ανάγκες του κάθε πειράματος. Σε μία περίπτωση το πλαίσιο καλύπτεται από ένα πλαστικό μηδενικού πορώδους και σε μια δεύτερη περίπτωση από ένα γεωργικό δίχτυ (εμπορικής ονομασίας Scirocco 50) με τιμή πορώδους ίση με 62%. Με τη βοήθεια μετρητή επιμήκυνσης (extensionmeter) ήταν εφικτό ανά πάσα στιγμή να είναι γνωστή η θέση του πλαισίου καθώς αυτό στρέφεται γύρω από άρθρωση με τη βοήθεια της ελαστικής στήριξης. Πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των πιέσεων που ο άνεμος ασκεί στο πλαίσιο καθώς το σύστημα ισορροπεί σε διάφορες θέσεις ισορροπίας. Επίσης με τη χρήση ανεμομέτρων επετράπη η συνεχής παρακολούθηση της προστατευτικής ικανότητας του ελαστικά στηριζόμενου πλαισίου για κάθε διαφορετική περίπτωση κάλυψης και ταχύτητα ανέμου.

Και στην αριθμητική προσομοίωση μελετήθηκε η αεροδυναμική και μηχανική συμπεριφορά του πλαισίου, τόσο με κάλυψη πλαστικού όσο και κάλυψη περατού δικτύου. Το δυναμικό φαινόμενο δεν μελετήθηκε εξ' ολοκλήρου με τη βοήθεια της υπολογιστικής προσομοίωσης διότι η αριθμητική προσομοίωση ενός τέτοιου φαινομένου είναι σημαντικά χρονοβόρα διαδικασία. Η μελέτη του φαινομένου, όπως

θα γίνει ξεκάθαρο στη συνέχεια, ήταν σύνθετη. Κάθε γωνία κλίσης του πλαισίου, αποτελεί μια δυναμική θέση ισορροπίας του συστήματος άνεμος – πλαίσιο με ελαστική στήριξη, για κάποια συγκεκριμένη τιμή ανεμοπίεσης πάνω στο πλαίσιο. Οι γωνίες κλίσης ισορροπίας υπολογίσθηκαν από την αλληλεπίδραση του ελαστικού συστήματος στήριξης του πετάσματος και των ανεμοπιέσεων που υπολογίσθηκαν με ανάλυση CFD για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Η ανεμοπίεση για την οποία το σύστημα ισορροπεί σε κάποια κλίση του πλαισίου υπολογίσθηκε με τη βοήθεια μη γραμμικής ανάλυσης. Πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις με τα αποτελέσματα των πλήρους κλίμακας πειραμάτων για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του αριθμητικού μοντέλου.

Για την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων μιας κατασκευής πλαισίου με ελαστική στήριξη πραγματοποιήθηκε και ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών πάνω στο πλαίσιο και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα μεγέθη υπολογισμένα για ένα κατακόρυφο πλαίσιο υπό την ίδια ένταση ανέμου αναφοράς. Στόχος ήταν να παρουσιαστεί και αναδειχθεί το υψηλό ποσοστό μείωσης των ανεμοπιέσεων και των εντατικών μεγεθών για ένα πλαίσιο στο οποίο δίνεται η δυνατότητα να μεταβάλλει την κλίση του μέσω της ελαστικής του στήριξης, σε αλληλεπίδραση με την ταχύτητα του ανέμου. Η μείωση αυτή μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση της κάλυψης με δίχτυ από τη στιγμή που, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η χρήση δικτύων οδηγεί σε εξομάλυνση της ροής και μείωση των φορτίων ανέμου. Κυρίως για γωνίες μεγαλύτερες των  $30^\circ$  όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια της εργασίας παρατηρούνται σημαντικές μειώσεις. Στα πλαίσια των σχεδιαστικών αναγκών που περιλαμβάνουν και τα λειτουργικά χαρακτηριστικών ενός ανεμοφράκτη, που είναι η ανάγκη κάλυψη της υπήνεμης περιοχής του (shelter effect), δεν έγινε μελέτη για πολύ μεγάλες γωνίες.

### **3.1 Πειράματα πλήρους κλίμακας**

Για τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου ερευνητικού τμήματος της διατριβής σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ειδική πειραματική διάταξη πλαισίου με ελαστική στήριξη (*Εικόνες 25 & 26*) στον πειραματικό αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η κατασκευή αυτή δημιουργήθηκε μετά από μελέτη η οποία αποτύπωνε τις ανάγκες της συγκεκριμένης ερευνητικής δραστηριότητας και πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο γεωργικών κατασκευών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο σχεδιασμός της βασίστηκε σε προτεινόμενες τιμές σχεδιασμού όπως δίνονται από τον Ευρωκώδικα (Eurocode 1-1-4) [21] και για το λόγο αυτό η κατασκευή έπρεπε να διαχωριστεί σε τρία τμήματα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 25*. Ο λόγος της διαίρεσης της κατασκευής είναι οι διαφορετικές τιμές φορτίων ανέμου που ασκούνται στα ελεύθερα άκρα μιας τέτοιας κατασκευής λόγω της διαφορετικής μορφής που αποκτά η ροή του ανέμου στις συγκεκριμένες θέσεις.

Οι διαστάσεις της κατασκευής ήταν  $11.2m$  μήκος και  $3m$  ύψος. Για την ανεμπόδιση κίνηση της κατασκευής, η άρθρωση της βάσης του πλαισίου γύρω από την οποία η κατασκευή μπορεί να στραφεί λόγω ανεμοπίεσης, βρισκόταν σε  $15cm$  ύψος από το έδαφος. Το κενό που δημιουργήθηκε στο κάτω τμήμα της κατασκευής δεν ήταν ικανό να επηρεάσει την αεροδυναμική συμπεριφορά της κατασκευής κατά την αλληλεπίδρασή της με τον άνεμο. Το πλαίσιο είχε τοποθετηθεί κάθετα σε ΒΑ (είτε ΝΔ) ανέμους και μπορούσε να μετατοπισθεί μόνο κατά τη μια διεύθυνση, αυτή που μπορούσε να προκληθεί από τους βορινούς ανέμους. Η επιλογή αυτή έγινε διότι η διεύθυνση αυτή του ανέμου είναι η επικρατέστερη στην περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν τα πλήρους κλίμακας πειράματα, όπως παρουσιάστηκε στην

παράγραφο 2.2. Κατά την αντίθετη διεύθυνση η κίνηση του πλαισίου παρεμποδιζόταν με τη βοήθεια κατάλληλων συρματόσχοινων τα οποία είχαν υπολογισθεί κατά το σχεδιασμό της κατασκευής ώστε να μπορούν να αντισταθμίζουν τα φορτία ανέμου κατά τη διεύθυνση αυτή.

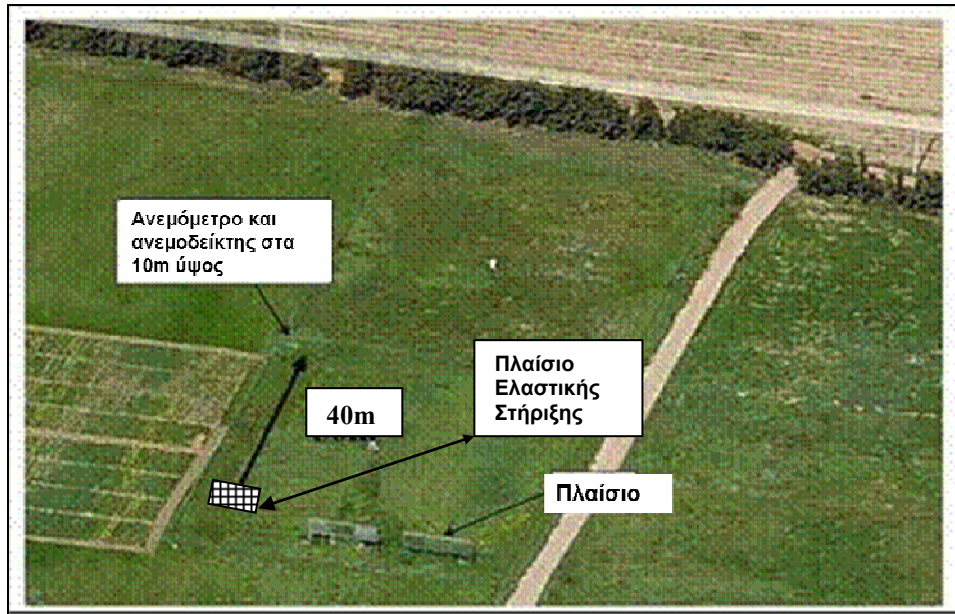


**Εικόνα 25.** Πλήρους κλίμακας πειραματική διάταξη πλαισίου με ελαστική στήριξη. Κάλυψη με μη περατό πλαστικό.



**Εικόνα 26.** Πλήρους κλίμακας πειραματική διάταξη πλαισίου με ελαστική στήριξη. Κάλυψη με περατό γεωργικό δίχτυ.

Στην *Εικόνα 27* δίνεται μια φωτογραφική κάτοψη του πειραματικού αγρού πάνω στην οποία έχει σχεδιασθεί η θέση της πειραματικής διάταξης του πλαισίου με ελαστική στήριξη. Σε απόσταση  $40m$  υπάρχει ιστός  $10m$ . Στην κορυφή του ιστού είναι τοποθετημένα ένα περιστροφικό ανεμόμετρο και ένας ανεμοδείκτης για τη συνεχή καταγραφή των ταχυτήτων και διευθύνσεων του ανέμου.



**Εικόνα 27.** Η θέση του ιστού 10m σε σχέση με τη θέση της κατασκευή του πλαισίου ελαστικής στήριξης στον πειραματικό αγρό.

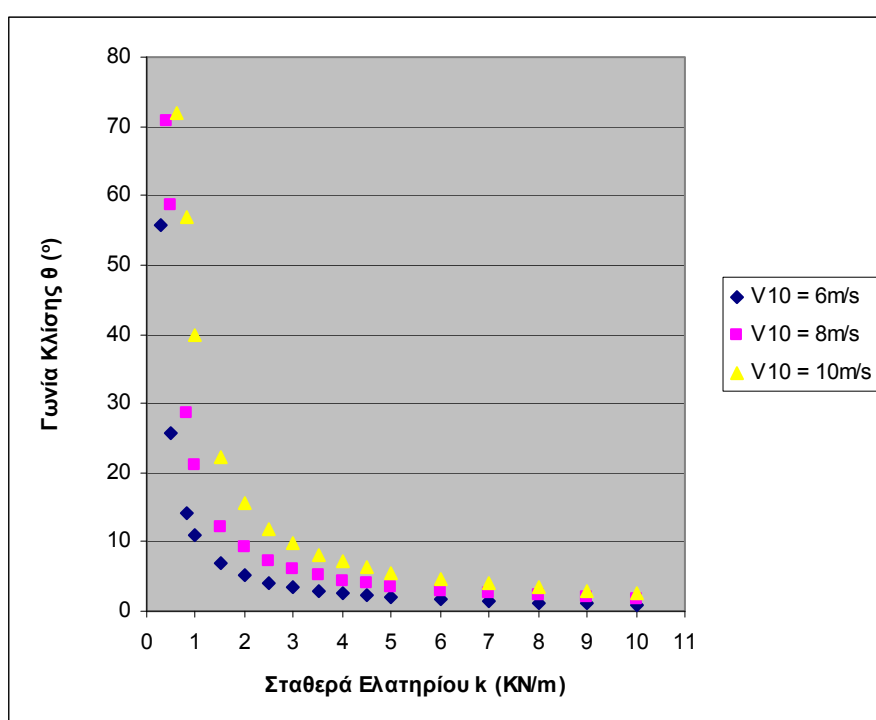


**Εικόνα 28.** Το πλαίσιο ελαστικής στήριξης. Χρήση των ελατηρίων για την επίτευξη κίνησης κατά την αλληλεπίδραση του πλαισίου με τον άνεμο και συρματόσχοινων για την στήριξη αλλά και αποφυγή πλαστικών παραμορφώσεων των ελατηρίων.

Η ελαστική στήριξη πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ελατηρίων. Τα ελατήρια, όπως φαίνονται και στην *Εικόνα 28*, ήταν προσαρμοσμένα από το ένα άκρο τους σε συρματόσχοινα τα οποία ήταν σταθερά στο έδαφος ενώ από το άλλο σε ειδικές εγκοπές που δημιουργήθηκαν πάνω στους στύλους στήριξης (σωλήνες διαμέτρου 60mm). Ειδικά συρματόσχοινα (stops) είχαν τοποθετηθεί στα δυο άκρα των ελατηρίων ώστε η επιμήκυνσή τους να μπορεί να περιοριστεί. Τα ελατήρια παραμένανε στην ελαστική περιοχή για μια συγκεκριμένη μέγιστη τιμή επιμήκυνσής

τους. Μεγαλύτερες επιμηκύνσεις, πέρα από τις οποίες τα ελατήρια θα υπόκειντο σε πλαστική παραμόρφωση με αποτέλεσμα τη μόνιμη αλλαγή των χαρακτηριστικών τους, δεν επιτρεπόταν μέσω των συρματόσχοινων stop.

Η επιλογή των χαρακτηριστικών των ελατηρίων έγινε έτσι ώστε να διατηρείται η ομοιόμορφη μετατόπιση του πλαισίου υπό δεδομένη ταχύτητα κάθετα προσπίπτοντος ανέμου. Κατά τη στατική μελέτη που προηγήθηκε υπολογίστηκε η ελαστική σταθερά καθενός από τα ελατήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή ώστε να εξασφαλισθεί η ίδια μετατόπιση των τριών τμημάτων του πλαισίου και η απόκρισή του σαν ενιαίου ελαστικού πετάσματος. Στη μελέτη συνυπολογίστηκαν οι αναμενόμενες μεγαλύτερες ανεμοπιέσεις στις δύο εξωτερικές οριακές ζώνες του πλαισίου. Επίσης, η επιλογή βασίστηκε στην ανάγκη για πλήρη καταγραφή του δυναμικού φαινομένου, το οποίο σημαίνει ότι έπρεπε να επιτρέπονται μεγάλες σχετικά μετατοπίσεις, για την μελέτη της συμπεριφοράς και των πλεονεκτημάτων της ελαστικής απόκρισης ενός πλαισίου που αλληλεπιδρά με τα φορτία ανέμου.



**Εικόνα 29.** Η σχέση κλίσης του πλαισίου ελαστικής στήριξης με τη σταθερά του ελατηρίου του κεντρικού στύλου στήριξης για διάφορες ταχύτητες ανέμου.

Στην *Εικόνα 29* παρουσιάζεται η σχέση της γωνίας  $\theta$  (η κλίση που το πλαίσιο αποκτά λόγω των φορτίων ανέμου) σε σχέση με την σταθερά  $k$  ( $kN/m$ ) του ελατηρίου του κεντρικού στύλου στήριξης για διάφορες ταχύτητες ανέμου όπως εξήχθη κατά τον αρχικό σχεδιασμό της κατασκευής. Είναι εμφανές πως για μεγάλες τιμές σταθεράς  $k$  του ελατηρίου, άσχετα από την ταχύτητα του προσπίπτοντος ανέμου, η κλίση του πλαισίου είναι πολύ μικρή, καθιστώντας την περιοχή αυτή μη επιθυμητή για τους σκοπούς του πειράματος. Το ενδιαφέρον εστιάστηκε στην περιοχή του διαγράμματος όπου η σταθερά του ελατηρίου είναι μικρή, υπάρχουν μεγάλες τιμές κλίσεων  $\theta$  και οι τιμές αυτές μεταβάλλονται σημαντικά με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου. Για την καταγραφή πλήρως ενός τέτοιου φαινομένου έπρεπε να επιτραπούν μεγάλες τιμές κλίσεων, όσο βέβαια το επέτρεπαν τα κατασκευαστικά δεδομένα των ελατηρίων (μέγιστη δυνατή παραμόρφωση των ελατηρίων). Ο

συνδυασμός των δυο αυτών παραμέτρων στην περίπτωση του αδιαπέραστου φύλου κάλυψης οδήγησε στην επιλογή ενός κεντρικού ελατηρίου με τιμή σταθεράς  $k=0.8kN/m$ . Άλλα δυο ελατήρια ήταν προσαρμοσμένα στους δυο στύλους στήριξης του κεντρικού τμήματος του πλαισίου με σταθερά  $k=0.4kN/m$  ενώ τα δυο τμήματα στις άκρες του πλαισίου είχαν τέσσερα ελατήρια σταθεράς  $k=0.22kN/m$ . Τα ελατήρια και στην περίπτωση του περατού καλύμματος είχαν τις ίδιες τιμές με αποτέλεσμα η μέγιστη κλίση που αποκτούσε το πλαίσιο με κάλυψη μη περατού πλαστικού ήταν  $37^\circ$  ενώ για το περατό γεωργικό δίχτυ  $15^\circ$ .

Με τη βοήθεια ενός μετρητή επιμήκυνσης (extensiometer), *Εικόνα 30*, ο οποίος ήταν τοποθετημένος σε ύψος  $35cm$  από την άρθρωση γύρω από την οποία μπορούσε να κινηθεί το πλαίσιο ( $50cm$  συνολικά από το έδαφος) και προσαρμοσμένος στον κεντρικό στύλο στήριξης ώστε να μετρά την απόσταση του στύλου από την αρχική, μηδενικής μετατόπισης, θέση του. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατό από τη γεωμετρία της κατασκευής να υπολογιστεί η γωνία κλίσης της αλλά και η επιμήκυνση των ελατηρίων. Με τις ταυτόχρονες μετρήσεις ταχυτήτων ανέμου στον ιστό  $10m$  στόχος ήταν να αποτυπωθεί η δυναμική του φαινομένου μέσα από μια σχέση ταχύτητας ανέμου - γωνίας κλίσης πλαισίου. Η σχέση αυτή υπολογιζόμενη και από το αριθμητικό μοντέλο και συγκρινόμενη με αυτή του συγκεκριμένου πειράματος πλήρους κλίμακας θα μπορούσε να απαντήσει στο θέμα αξιοπιστίας της υπολογιστικής προσομοίωσης. Επίσης από την επιμήκυνση των ελατηρίων θα μπορούσαν να υπολογιστούν οι πιέσεις πάνω στο πλαίσιο για τις διάφορες θέσεις ισορροπίας (σε διάφορες γωνίες κλίσης) του συστήματος άνεμος – πλαίσιο και να εξαχθούν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και τα πλεονεκτήματα της κατασκευής ελαστικής στήριξης, όσο αφορά τη συνολική πίεση που ο άνεμος ασκεί σε αυτή αλλά και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στις στηρίξεις της ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κάλυψη.



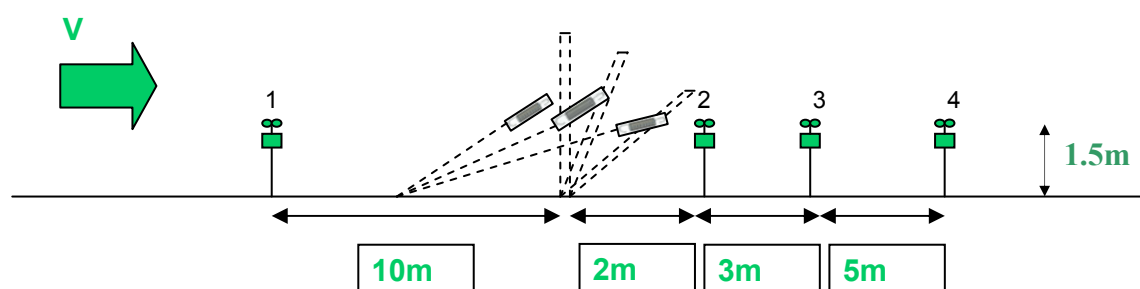
**Εικόνα 30.** Ο μετρητής επιμήκυνσης (extensionmeter).



Ακόμη τέσσερα περιστροφικά ανεμόμετρα (*Εικόνα 31*) χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της προστατευτικής ικανότητας του πλαισίου ελαστικής στήριξης. Ένα από τα ανεμόμετρα βρισκόταν προσήνεμα του πλαισίου σε απόσταση δέκα μέτρα από αυτό. Τα άλλα τρία βρισκόντουσαν τοποθετημένα στην υπήνεμη περιοχή της κατασκευής, ώστε να ελεγχθεί, βάσει της υπήνεμης ταχύτητας του ανέμου, η προστασία που παρέχει το πλαίσιο ελαστικής στήριξης στις διάφορες θέσεις ισορροπίας με τον άνεμο αλλά και κατά την εξέλιξη του συνολικού δυναμικού φαινομένου. Όλα τα ανεμόμετρα τοποθετήθηκαν σε ύψος ίσο με το μισό του κατακόρυφου πλαισίου, δηλαδή  $1.5\text{m}$ . Οι θέσεις των ανεμομέτρων παρουσιάζονται στο σχέδιο της *Εικόνας 32*.



**Εικόνα 31.** Περιστροφικά ανεμόμετρα στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου ελαστικής στήριξης για τον έλεγχο της προστατευτικής ικανότητας της κατασκευής.



**Εικόνα 32.** Σχέδιο απεικόνισης των θέσεων των περιστροφικών ανεμομέτρων γύρω από την κατασκευή του πλαισίου ελαστικής στήριξης για την εκτίμηση της προστατευτικής ικανότητας του πλαισίου.

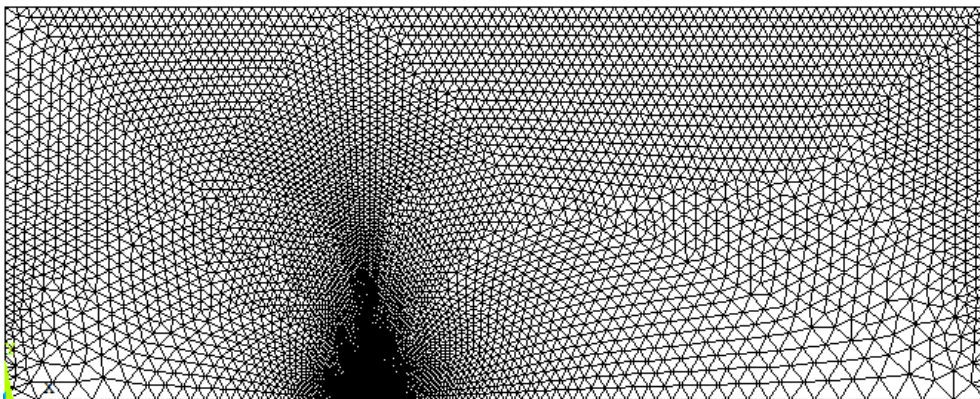
Μόνο κάθετη διεύθυνση ανέμου, δηλαδή ΒΑ, προς το πλαίσιο ελήφθη υπόψη στις μετρήσεις των πειραμάτων ( $\pm 20^\circ$ ), ενώ αγνοήθηκαν τιμές μετρούμενων ταχυτήτων κάτω των  $2\text{m/s}$  για την αποφυγή σφαλμάτων εξαιτίας της μειωμένης ευαισθησίας των ανεμομέτρων στις χαμηλές ταχύτητες. Η ακρίβεια των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου με τα συγκεκριμένα όργανα ήταν  $0.1\text{m/s}$ .

### 3.2 Αριθμητική Προσομοίωση του προβλήματος

Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε υπολογιστικά με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS-FLOTRAN και κατ' επέκταση με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που το υπολογιστικό αυτό πρόγραμμα χρησιμοποιεί. Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πετάσματος δυο διαστάσεων και θεωρήθηκε πως η διάταξη αυτή βρίσκεται σε μια δυσδιάστατη επίσης ορθογώνια ανεμοσήραγγα. Το πλέγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η διάταξη στο σύνολό της (ανεμοσήραγγα και πλαίσιο) αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό στοιχείων (elements) για κάθε περίπτωση γωνίας κλίσης του πετάσματος ελαστικής στήριξης που μελετήθηκε, όπως και για την περίπτωση μη ελαστικής στήριξης, ο οποίος ήταν 52822 elements στην περίπτωση της μη περατής κάλυψης πλαστικού, ενώ 56422 elements χρησιμοποιήθηκαν για στην περίπτωση της προσομοίωσης του περατού γεωργικού δικτυού .

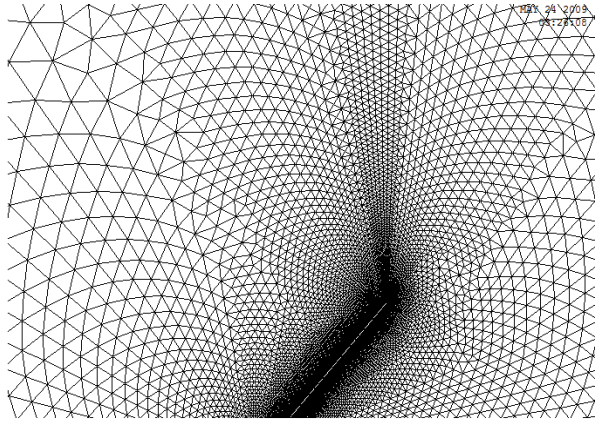
Οι διαστάσεις της ανεμοσήραγγας ήταν 100 και 40m κατά τους x,y άξονες αντίστοιχα ή ισοδύναμα 33,3h και 13,3h κατά την παραπάνω αντιστοιχία, όπου h θεωρούμε το ύψος του πετάσματος,  $h = 3m$

Τα στοιχεία τα οποία αποτελούσαν το πλέγμα στην αριθμητική προσομοίωση ήταν τριγωνικά. Μια απεικόνιση της δομής του πλέγματος της ανεμοσήραγγας παρουσιάζεται στην *Εικόνα 33*.



**Εικόνα 33.** Συνολική μορφή πλέγματος της ανεμοσήραγγας.

Στην *Εικόνα 33* παρουσιάζεται συνολικά το πλέγμα το οποίο έχει δομηθεί με τριγωνικά στοιχεία. Στην περιοχή όπου διακρίνεται η αύξηση των στοιχείων είναι η περιοχή πλησίον του πετάσματος. Η δομή του πλέγματος ακολουθεί τη μορφή αυτή διότι τα πιο έντονα αεροδυναμικά φαινόμενα, και κατά κύριο λόγο τα τυρβώδη, εμφανίζονται γύρω από το πλαίσιο, στην υπήνεμη και προσήνεμη πλευρά του. Για το λόγο αυτό, το πλέγμα γίνεται λεπτομερέστερο, δηλαδή αποτελείται από μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων καθώς πλησιάζουμε το πλαίσιο.



**Εικόνα 34.** Μεγέθυνση του πλέγματος στην προσήνεμη και υπήνεμη περιοχή του πλαισίου.

Στην *Εικόνα 34* γίνεται εμφανής η δομή της διακριτοποίησης της περιοχής περί το υπό κλίση πλαίσιο. Η εικόνα αυτή είναι μια μεγέθυνση του πλέγματος της *Εικόνας 35*, κοντά στην περιοχή του πετάσματος. Από την *Εικόνα 34* μπορεί να γίνει αντιληπτή η λογική διαφοροποίησης του πλέγματος, δηλαδή η ανάγκη εντονότερης διακριτοποίησης στην περιοχή του πετάσματος. Η συγκεκριμένη περίπτωση αφορά τη μη περατή κάλυψη για αυτό και στο κέντρο της πύκνωσης παρατηρείται απουσία στοιχείων.

Τα εξωτερικά στοιχεία που καλύπτουν τα όρια της ανεμοσήραγγας έχουν μέγεθος  $1m$  ενώ αυτά στην εξωτερική επιφάνεια του πλαισίου  $0.005m$  (αλλά και στο εσωτερικό του πλαισίου όταν αυτό είναι περατό) ή αντίστοιχα αδιαστατοποιώντας με το ύψος  $h$  του πλαισίου  $0.33h$  και  $0.00167h$ . Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αυξάνοντας τα στοιχεία στο πλέγμα παρατηρήθηκαν ασήμαντες μεταβολές στα αποτελέσματα. Περαιτέρω πύκνωση κρίθηκε μη απαραίτητη.

### 3.3 Μοντελοποίηση της τύρβης

Το μοντέλο τύρβης το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην αριθμητική προσομοίωση είναι το μοντέλο  $k-\varepsilon$  RNG. Το μοντέλο αυτό είναι μια βελτιωμένη μορφή του συνήθους μοντέλου  $k-\varepsilon$  και προτιμήθηκε διότι το τελευταίο υπερεκτιμά σε πολλές περιπτώσεις τις τιμές της κινητικής ενέργειας της τύρβης, όπως σε ροές που προσπίπτουν σε εμπόδια και αντιμετωπίζει συγκεκριμένα, πρόβλημα στα σημεία όπου υπάρχουν απότομες μεταβολές στην κλίση της ταχύτητας (Awbi, 1991). Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από τον τρόπο με τον οποίο το ίδιο το μοντέλο αντιμετωπίζει τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας της τύρβης σε θερμότητα. Το μοντέλο  $k-\varepsilon$  RNG αντιμετωπίζει πιο αποτελεσματικά την μετατροπή της κινητικής ενέργειας της τύρβης σε θερμότητα. Δεν υποθέτει ομοιόμορφη απόσβεση των στροβίλων κάθε μεγέθους όπως το *standard*  $k-\varepsilon$ , αλλά κάποιοι στροβίλοι φιλτράρονται.

Επίσης το  $k-\varepsilon$  RNG είναι ένα από τα μοντέλα που μπορεί να δώσει αποτελέσματα χωρίς να καταναλώνει σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, ανάλογα βέβαια με το εκάστοτε πρόβλημα.

### 3.4 Οριακές συνθήκες – Προσομοίωση γεωργικών διχτυών ως περατά υλικά

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση των διαφόρων θέσεων ισορροπίας του πλαισίου ελαστικής στήριξης είναι

πανομοιότυπες με τις συνθήκες προσομοίωσης της προηγούμενης ερευνητικής μελέτης (ροή του ανέμου γύρω από υπερυψωμένο πλαίσιο) και παρουσιάζονται αναλυτικά στην *Παράγραφο 2.5*.

Η προσομοίωση των γεωργικών δικτύων έχει επίσης αναλυθεί και παρουσιαστεί διεξοδικά στις *Παραγράφους 2.3 & 2.6*. Η επιλογή του συμβατικού πάχους του γεωργικού δικτύου κατά την προσομοίωση ήταν *3cm* όπως και στις προσομοιώσεις της προηγούμενης ερευνητικής δραστηριότητας (*Παράγραφοι 2.1-2.7*) και επιλέχθηκε με βάση όλα τα κριτήρια που θεωρήθηκαν απαραίτητα για την αποτύπωση του προβλήματος με τη βοήθεια της αριθμητικής προσομοίωσης.

### **3.5 Σύνθετη ανάλυση αριθμητικής προσομοίωσης ανεμοπιέσεων και μη – γραμμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων του πλαισίου**

Η υπολογιστική προσομοίωση δεν χρησιμοποιήθηκε για τη συνολική απεικόνιση του φαινομένου λόγω του υψηλού απαιτούμενου κόστους σε υπολογιστικό χρόνο, ώστε να γίνει εφικτή η πλήρης προσομοίωση ενός δυναμικού φαινομένου. Ακολουθήθηκε μια σύνθετη διαδικασία η οποία συμπεριλάμβανε την αριθμητική προσομοίωση ανεμοπιέσεων αλλά και μη – γραμμική ανάλυση των μεγάλων μετατοπίσεων της απόκρισης του πλαισίου στις αντίστοιχες ανεμοπιέσεις.

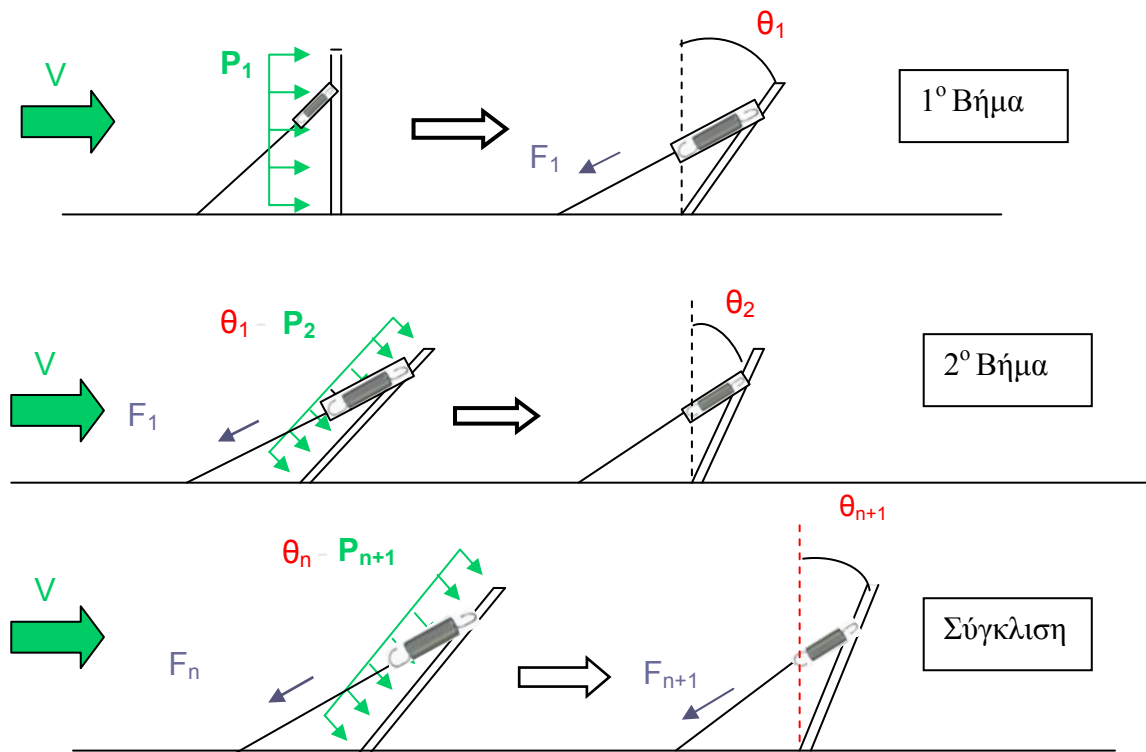
Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης (steady state), ενός μοντέλου πλαισίου, περατής και μη κάλυψης, υπό διάφορες γωνίες κλίσης. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής πίεσης  $c_{p-net}$  για κάθε γωνία κλίσης του πλαισίου. Από τη διαδικασία αυτή εξήχθησαν δυο σχέσεις συντελεστή συνολικής (προσήνεμης και υπήνεμης) πίεσης  $c_{p-net}$  – γωνίας κλίσης  $\theta$  για τις δυο διαφορετικές περιπτώσεις κάλυψης του πλαισίου. Με τον τρόπο αυτό μπορούσε να είναι γνωστή η πίεση πάνω στο πλαίσιο υπό οποιαδήποτε κλίση, για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Να αναφερθεί ότι ο συντελεστής συνολικής πίεσης δίνεται από τη σχέση:

$$C_{p-net} = \frac{P_{net}}{\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot V^2} \quad (18)$$

όπου  $P_{net}$  η συνολική πίεση που ασκείται πάνω στο πλαίσιο ισούται με την πίεση της προσήνεμης επιφάνειας αφαιρώντας την πίεση που δέχεται η υπήνεμη πλευρά:

$$P_{net} = P_{windward\_face} - P_{leeward\_face} \quad (19)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα, ίση με  $1,25 \text{ kg/m}^3$ , και  $V(\text{m/s})$  η ταχύτητα αναφοράς (ο παρονομαστής είναι η δυναμική πίεση και ουσιαστικά αδιαστατοποιεί την τιμή της πίεσης) που έχει ορισθεί στην εργασία αυτή σε ύψος  $3\text{m}$ , που είναι το ύψος του πετάσματος.



**Εικόνα 35.** Μη γραμμική ανάλυση για τον υπολογισμό θέσεων ισορροπίας του πλαισίου ελαστικής στήριξης κατά την αλληλεπίδραση του με τον άνεμο.

Στην *Εικόνα 35* δίνεται σχηματικά η χρήση της μη – γραμμικής ανάλυσης. Παρουσιάζονται οι δυο πρώτες επαναλήψεις καθώς και η τελική η οποία δίνει και τα κριτήρια σύγκλισης του προβλήματος. Υποθέτουμε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου  $V$ , ενώ το ελαστικά στηριζόμενο πλαίσιο βρίσκεται στην αρχική θέση ισορροπίας, δηλαδή κάθετα στο έδαφος. Ο άνεμος προσπίπτει πάνω στο πλαίσιο και αυτό με τη βοήθεια της ελαστικής στήριξης είναι ικανό να μετατοπισθεί (με στροφή περί την βάση). Έχοντας εξάγει την σχέση συντελεστή συνολικής πίεσης – γωνίας κλίσης μπορούμε να γνωρίζουμε τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας ανέμου και της πίεσης που ασκεί ο άνεμος πάνω στο πλαίσιο. Έτσι η πίεση  $P_1$  πάνω στο πλαίσιο, που αντιστοιχεί στην πρώτη επανάληψη, είναι γνωστή. Στη θέση αυτή το ελατήριο δεν ασκεί καμία δύναμη από τη στιγμή που δεν έχει υποστεί καμία παραμόρφωση. Γνωρίζοντας την πίεση και με τη βοήθεια στατικής ανάλυσης υπολογίζουμε μια νέα θέση (γωνία  $\theta_1$ ) του πλαισίου η οποία όμως δεν αποτελεί θέση ισορροπίας μιας και η γεωμετρία και κατά επέκταση η πίεση πάνω στο πλαίσιο αλλάζει καθ' όλη τη διάρκεια του δυναμικού φαινομένου. Για το λόγο αυτό γίνεται άλλωστε και χρήση της μη – γραμμικής ανάλυσης.

Στη νέα θέση με γωνία κλίσης  $\theta_1$ , υπολογίζεται η τροποποιημένη πίεση πάνω στο πλαίσιο από την σχέση  $c_{p-net}$  – γωνίας κλίσης  $\theta$ . Στη θέση αυτή εκτός από την πίεση  $P_2$  λόγω των φορτίων ανέμου πάνω στο πλαίσιο, υπάρχει και μια δύναμη επαναφοράς  $F_1$  η οποία προέρχεται από τα παραμορφωμένα ελατήρια. Η δύναμη του ελατηρίου πρέπει να συμπεριληφθεί στη νέα στατική ανάλυση και με τον τρόπο αυτό να προκύψει η νέα διορθωμένη θέση ισορροπίας που αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης ίση με  $\theta_2$ . Μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων, έστω  $n$ , το πρόβλημα οδηγείται σε σύγκλιση. Τότε το πλαίσιο αποκτά μια θέση ισορροπίας σε γωνία ίση με  $\theta_{n+1}$ . Οι συνθήκες σύγκλισης ορίζονται ως εξής:

$$\theta_{n+1} - \theta_n \rightarrow 0$$

$$P_{n+1} - P_n \rightarrow 0$$

$$F_{n+1} - F_n \rightarrow 0$$

(20)

Για διάφορες τιμές ταχύτητας καταλήγουμε στην προσομοίωση του συνολικού δυναμικού φαινομένου εξάγοντας μια σχέση ταχύτητας προσπίπτοντος ανέμου  $V$  και γωνίας ισορροπίας  $\theta$  του πλαισίου ελαστικής στήριξης. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε χώρα δυο φορές ώστε να καλυφθούν και οι δυο περιπτώσεις περατής ή μη περατής κάλυψης του πλαισίου. .

### 3.6 Αποτελέσματα

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη της αλληλεπίδρασης πετάσματος ελαστικής στήριξης, περατής και μη κάλυψης, με τα προσπίπτοντα φορτία ανέμου με τη βοήθεια πλήρους κλίμακας πειραμάτων αλλά και δυσδιάστατης αριθμητικής προσομοίωσης. Στα πλήρους κλίμακας πειράματα ταυτόχρονες και συνεχείς μετρήσεις ταχυτήτων ανέμου αλλά και της αλλαγής θέσης του πλαισίου ελαστικής στήριξης (αλλαγή γωνίας κλίσης  $\theta$ ) οδήγησαν στην συλλογή δεδομένων με τα οποία μπορούσε να αναλυθεί συνολικά το δυναμικό φαινόμενο και να εκτιμηθούν τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας κατασκευής όσο αφορά τη μείωση των πιέσεων, λόγω του τύπου αυτού ελαστικής στήριξης, τη μείωση των εντατικών μεγεθών στην κατασκευή, αλλά και την προστατευτική ικανότητα ενός τέτοιου πλαισίου σε σχέση με ένα αμετακίνητο κατακόρυφο πλαίσιο.

Για την πλήρη προσομοίωση του φαινομένου ακολουθήθηκε μια σύνθετη διαδικασία που συμπεριλάμβανε ανάλυση αριθμητικής προσομοίωσης ανεμοπίεσεων και μη – γραμμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων του πλαισίου. Με τη χρήση της αριθμητικής προσομοίωσης ήταν γνωστά τα φορτία ανέμου, για διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου, για κάθε κλίση που το πλαίσιο μπορεί να αποκτήσει, ενώ με τη μη – γραμμική ανάλυση υπολογίστηκε η ανεμοπίεση με την οποία το σύστημα ανέμου – πλαισίου ελαστικής στήριξης ισορροπεί σε δεδομένη κλίση. Καθώς η μη – γραμμική ανάλυση οδηγείται στη σύγκλιση και το σύστημα φτάνει στην ισορροπία μπορούν να υπολογιστούν τα εντατικά μεγέθη πάνω στην κατασκευή και να γίνει εμφανές αν μια τέτοια κατασκευή πλεονεκτεί σε σχέση με μια αντίστοιχη χωρίς ελαστική στήριξη (αυτό μπορεί να επιτευχθεί εάν θεωρηθεί άπειρη η σταθερά των χρησιμοποιούμενων ελατηρίων).

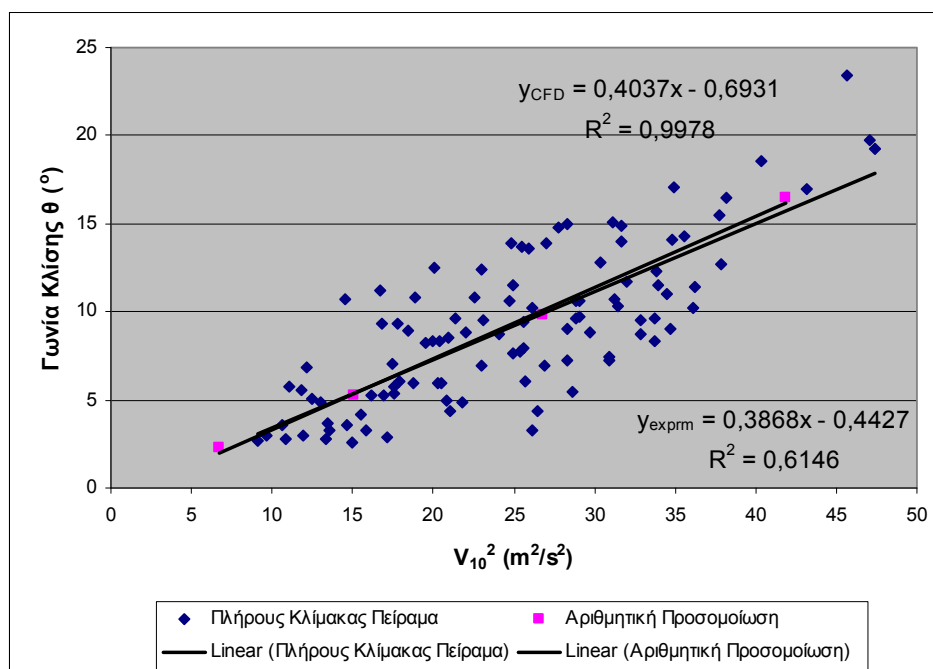
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των αντίστοιχων πειραμάτων πλήρως κλίμακας για την εκτίμηση της αξιοπιστίας της αριθμητικής προσομοίωσης αλλά και συνολικά της σύνθετης διαδικασίας που συμπεριλάμβανε ανάλυση αριθμητικής προσομοίωσης ανεμοπίεσεων και μη – γραμμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων του πλαισίου.

#### 3.6.1 Προσομοίωση του δυναμικού φαινομένου – Εκτίμηση αξιοπιστίας του μοντέλου προσομοίωσης.

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις αποτελούν ένα σχετικά πρόσφατο εργαλείο στην επίλυση ρευστοδυναμικών προβλημάτων. Συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια υπάρχει ραγδαία εξέλιξη στον τομέα αυτό. Με τη χρήση τους είναι εφικτή η απεικόνιση σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό διαφορετικής φύσεως προβλημάτων, με

αποτέλεσμα ερευνητικές δραστηριότητες και μελέτες να βασίζονται ολοένα και περισσότερο σε αυτές τις μεθόδους ανάλυσης. Το οικονομικό όφελος αλλά και η εξοικονόμηση χρόνου που μπορούν να προσφέρουν αποτελούν κύρια πλεονεκτήματα της αριθμητικής προσομοίωσης σε σύγκριση με ένα πλήρους κλίμακας πείραμα. Ένας από τους βασικούς στόχους της διατριβής αυτής ήταν η χρήση και η εκτίμηση της αξιοπιστίας αριθμητικών προσομοιώσεων για την επίλυση των συγκεκριμένων προβλημάτων. Όπως προαναφέρθηκε και στο συγκεκριμένο ερευνητικό κομμάτι της διατριβής έγινε προσπάθεια να προσομοιωθεί το υπό μελέτη πρόβλημα με ένα αριθμητικό μοντέλο.

Βασικός στόχος ώστε να αναδειχθεί η αξιοπιστία του μοντέλου στην προκειμένη μελέτη ήταν να προσομοιωθεί κατάλληλα συνολικά το δυναμικό φαινόμενο. Για να επιτευχθεί αυτό συγκρίθηκαν τα πειραματικά δεδομένα που μετρήθηκαν στα πειράματα πλήρους κλίμακας με τα αποτελέσματα που η σύνθετη διαδικασία (αριθμητική προσομοίωση – μη – γραμμική ανάλυση) έδωσε, όσο αφορά τη σχέση ταχύτητας ανέμου και γωνίας κλίσης του πλαισίου με ελαστική στήριξη.



**Εικόνα 36.** Σύγκριση της σχέσης του τετραγώνου ταχύτητας ανέμου  $V$  στα  $10m$  ύψος με τη γωνία κλίσης  $\theta$  που αποκτά το πλαίσιο ελαστικής στήριξης μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αριθμητικής προσομοίωσης. Κάλυψη μη περατού υλικού.

Στην *Εικόνα 36* παρουσιάζεται η σχέση της ταχύτητας του ανέμου στο τετράγωνο με τη γωνία κλίσης του πλαισίου όπως καταγράφηκε από το πλήρους κλίμακας πείραμα (μπλε σημεία) και όπως υπολογίστηκε από το συνδυασμό αριθμητικής προσομοίωσης και μη – γραμμικής ανάλυσης (ροζ σημεία), για την περίπτωση του πλαισίου με μη περατή κάλυψη. Είναι εμφανές πως τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε εξαιρετική συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Αυτό αποδεικνύεται και από τις κλίσεις των γραμμών παρεμβολής (regression lines), όπως αναγράφονται και διακρίνονται πάνω στο διάγραμμα, οι οποίες σχεδόν συμπίπτουν. Στη συνέχεια εξηγείται για ποιους λόγους η συσχέτιση είχε σχετικά χαμηλές τιμές. Είναι προφανές πως η προσομοίωση του φαινομένου πραγματοποιήθηκε επιτυχώς και το αριθμητικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί

αξιόπιστο και κατάλληλο για επιπλέον ανάλυση σχετικά με τις πιέσεις πάνω στο πλαίσιο καθώς και τα εντατικά μεγέθη όπως αυτά αναπτύσσονται πάνω στο πλαίσιο.

Στην *Εικόνα 37* παρουσιάζεται η αντίστοιχη σύγκριση στην περίπτωση που το πλαίσιο καλύπτεται από γεωργικό δίχτυ 62% πορώδες. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στα δυο διαγράμματα σύγκρισης της αριθμητικής προσομοίωσης με το πλήρους κλίμακας πείραμα απουσιάζουν χαμηλές τιμές ταχύτητας ( $V > 3m/s$ ). Δύο είναι οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτή. Η καλή λειτουργία των περιστροφικών ανεμομέτρων απαιτεί την παρουσία ταχυτήτων μεγαλύτερων των  $2m/s$ . Για μικρότερες τιμές της προαναφερθείσας τιμής σφάλματα λόγω αδράνειας είναι πιθανό να παρουσιαστούν γεγονός που οδήγησε στην απόρριψη των τιμών αυτών για την αποφυγή λήψης εσφαλμένων δεδομένων. Οι χαμηλές ταχύτητες όμως σχετίζονται και με την εμφάνιση προβλημάτων σχετικά με την απόκριση της κατασκευής κατά την αλληλεπίδρασή της με τον άνεμο. Το σημαντικό βάρος της κατασκευής έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονων τριβών στις αρθρώσεις και δυσκολία στην στροφή και σωστή (για ιδεατές αρθρώσεις) λειτουργία της κατασκευής σε πολύ χαμηλές τιμές ταχυτήτων. Μετά από ανάλυση των πειραματικών δεδομένων κρίθηκε απαραίτητη η επιλογή ταχυτήτων μεγαλύτερων των  $3m/s$ .

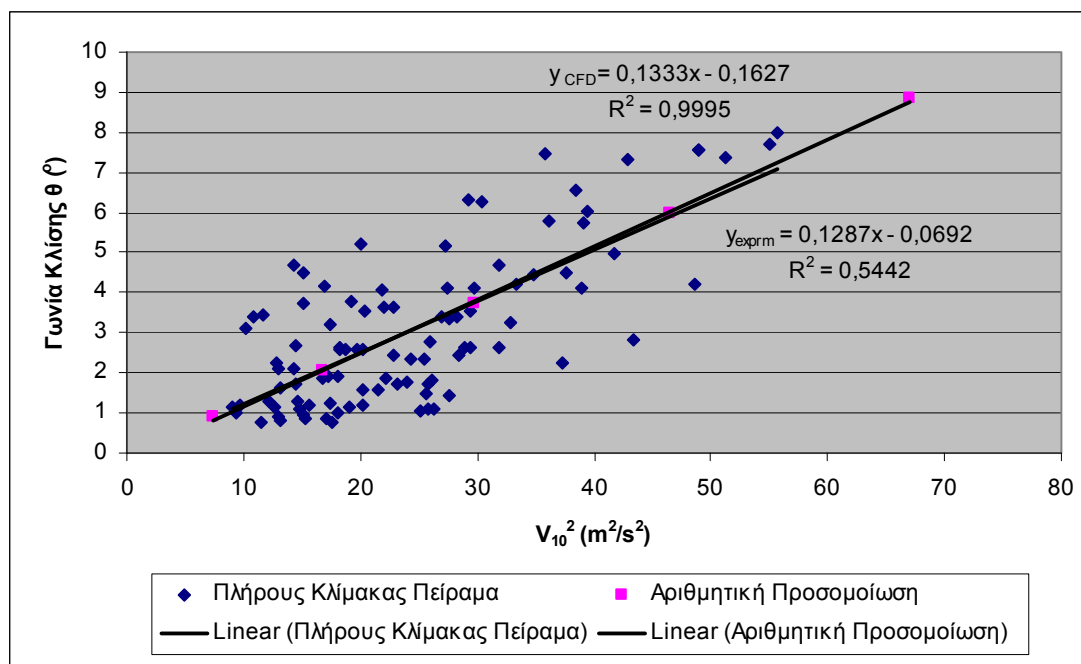
Προβλήματα τα οποία προήλθαν από την καταπόνηση και τη μη σωστή λειτουργία της ελαστικής στήριξης της κατασκευής μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα μετρήσεων οδήγησαν στην απόρριψη των δεδομένων αυτών. Σημαντικές τριβές άρχισαν να αναπτύσσονται στις αρθρώσεις του πλαισίου με τη βάση με αποτέλεσμα για μικρές τιμές ταχυτήτων να μην είναι εφικτή η σωστή απόκριση του πλαισίου. Αποτέλεσμα αυτού ήταν για μικρές τιμές ταχυτήτων ανέμου να διακρίνεται ένα πλατώ σχεδόν μηδενικών γωνιών. Αναγκαστικά συνεπώς έπρεπε να επιλεγθούν μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου ώστε οι γωνίες κλίσης του πλαισίου να είναι εκτός του πλατώ και το σύστημα να βρίσκεται σε περιοχή καλής λειτουργίας.

Και σε αυτή την περίπτωση μπορεί να παρατηρηθεί το γεγονός πως τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις. Οι κλίσεις των ευθειών παρεμβολής το αποδεικνύουν καθώς βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία. Το υπολογιστικό μοντέλο είναι συνεπώς αξιόπιστο και στην περίπτωση κάλυψης περατού υλικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση. Το συνολικό συμπέρασμα είναι πως η προσομοίωση του συνολικού δυναμικού φαινομένου, με τη βοήθεια της σύνθετης ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε (αριθμητική προσομοίωση – μη-γραμμική ανάλυση) είναι εφικτή για οποιαδήποτε χρησιμοποιούμενη κάλυψη, περατού ή μη περατού υλικού.

Όπως παρατηρείται στα διαγράμματα της *Εικόνας 36* και *37* η συσχέτιση είναι σχετικά χαμηλή στην περίπτωση των πειραματικών δεδομένων ( $R^2 = 0.6146$  για μη περατό πλαίσιο ελαστικής στήριξης και  $R^2 = 0.5442$  για το αντίστοιχο περατό). Αυτό οφείλεται σε τρεις διαφορετικούς λόγους. Αρχικά, σημαντικό ρόλο έπαιξε η απόσταση μεταξύ του ανεμόμετρου μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου στα  $10m$  ύψος και του μετρητή επιμήκυνσης που είναι τοποθετημένος στην κατασκευή. Η απόσταση αυτή ήταν  $40m$  (*Εικόνα 27*) και οι αλλαγές που μπορεί να υποστεί η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου στην απόσταση αυτή μπορούν να επηρεάσουν την τιμή της συσχέτισης. Επίσης, σημαντικό ρόλο διέτελεσε και η μεταβλητότητα του ίδιου του ανέμου. Για παράδειγμα οι ριπές ανέμου, οι οποίες αποτελούν ένα ταχύτατο φαινόμενο, πιθανότατα να μην είναι δυνατό να μετρηθούν με ακρίβεια. Τέλος, η τιμές της συσχέτισης πιθανώς να επηρεάστηκαν από την αδράνεια της κατασκευής η οποία οφείλεται στην μάζα της. Ο παράγοντας αυτός επηρέαζε και τις τριβές που παρουσιάζονταν στις αρθρώσεις του πλαισίου με τη βάση στήριξης και κατ' επέκταση τη των μετρήσεων του συστήματος.



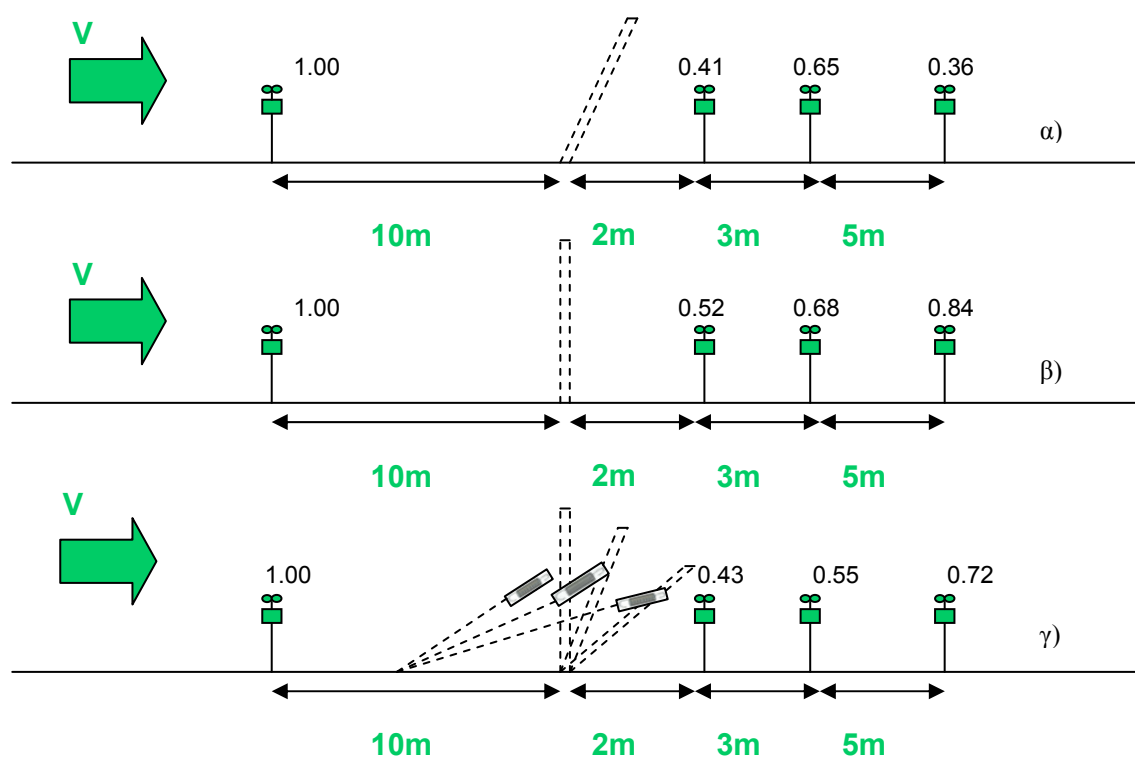
Σύγκριση μεταξύ του πλήρους κλίμακας πειράματος και της αριθμητικής προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε και για τον έλεγχο της προστασίας της υπήνεμης πλευράς στην περίπτωση μη-περατού πλαισίου. Μετρήθηκαν οι ταχύτητες σε τέσσερις θέσεις, μια προσήνεμη και τρεις υπήνεμες. Το προσήνεμο ανεμόμετρο (10m απόσταση από το πλαίσιο) θεωρήθηκε το ανεμόμετρο αναφοράς και υπολογίστηκαν οι λόγοι ταχυτήτων του κάθε υπήνεμου ανεμόμετρου με το προσήνεμο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά στην *Εικόνα 38*.



**Εικόνα 37.** Σύγκριση της σχέσης του τετραγώνου της ταχύτητας ανέμου  $V$  στα 10m ύψος με τη γωνία κλίσης  $\theta$  που αποκτά το πλαίσιο ελαστικής στήριξης μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αριθμητικής προσομοίωσης. Κάλυψη περατού υλικού 62% πορώδους.

Στην *Εικόνα 38* διακρίνονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις για τις οποίες μελετήθηκε η προστατευτική ικανότητα του πλαισίου. Οι περιπτώσεις  $\beta$ ) και  $\gamma$ ) αφορούν το πλήρους κλίμακας πείραμα και αντιστοιχούν σε ακίνητο και ελαστικής στήριξης πλαίσιο. Η περίπτωση  $\alpha$ ) αντιστοιχεί στην αριθμητική προσομοίωση. Στόχος ήταν να μετρηθούν στην υπήνεμη περιοχή οι ταχύτητες ανέμου και να φανεί πως μεταβάλλεται το πεδίο ροής υπήνεμα, καθώς το πλαίσιο μετατρέπεται από σταθερό σε ελαστικής στήριξης, ενώ η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιείται για να ελεγχθεί η αξιοπιστία του αριθμητικού μοντέλου. Επειδή η αριθμητική προσομοίωση δεν απεικονίζει συνολικά το δυναμικό φαινόμενο, οι τιμές που παρουσιάζονται προήλθαν θέτοντας ως ταχύτητα εισόδου στις οριακές συνθήκες της αριθμητικής προσομοίωσης μια υψηλή τιμή της ταχύτητας, βάσει των μετρήσεων του πλήρους κλίμακας πειράματος, και ως γωνία κλίσης – ισορροπίας του πλαισίου την αντίστοιχη γωνία στην οποία φτάνει το πλαίσιο για αυτή την ταχύτητα ανέμου. Οι τιμές αυτές, οι οποίες μπορούν να προκύψουν και από τα διαγράμματα της *Εικόνας 36*, ήταν  $V_{10}=7\text{m/s}$  και  $\theta=20^\circ$ . Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν ώστε να μελετηθεί, για τις μεγάλες γωνίες κλίσης στις οποίες ισορροπεί το σύστημα, (πλαίσιο ελαστικής στήριξης – ταχύτητα ανέμου) η προστασία της υπήνεμης περιοχής με τη βοήθεια της αριθμητικής μεθόδου και να συγκριθεί με το πλήρους κλίμακας πείραμα.

Τα αποτελέσματα ταχυτήτων ανέμου στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου ελαστικής στήριξης, όπως προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση βρίσκονται σε μερική συμφωνία με αυτά του πλήρους κλίμακας πειράματος (για το πλαίσιο με ελαστική στήριξη – περίπτωση γ)). Για τα δυο πρώτα υπήνεμα ανεμομέτρα, η σύγκριση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων βρίσκονται σε σχετική συμφωνία. Στην περίπτωση όμως του τρίτου (πιο απομακρυσμένου) ανεμομέτρου τα αποτελέσματα αποκλίνουν σημαντικά. Κάτι αντίστοιχο παρατηρήθηκε και στην *Παράγραφο 2.7.1* όπου και εκεί συγκρίθηκαν ταχύτητες ανέμου, για ροή γύρω από μη περατό υπερυψωμένο πλαίσιο. Τα μη ικανοποιητικά αποτελέσματα των υπήνεμων ταχυτήτων, όπως προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση στην περίπτωση του μη περατού πλαισίου ελαστικής στήριξης αποδίδονται στο μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως εν γένει τα μοντέλα *k-ε* παρουσιάζουν αδυναμίες στην απεικόνιση των έντονα τυρβωδών φαινομένων που παρατηρούνται σε περιπτώσεις όπως η υπό εξέταση (αποκόλληση της ροής, δημιουργία στροβίλων). Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο με βάση την διεθνή βιβλιογραφία.

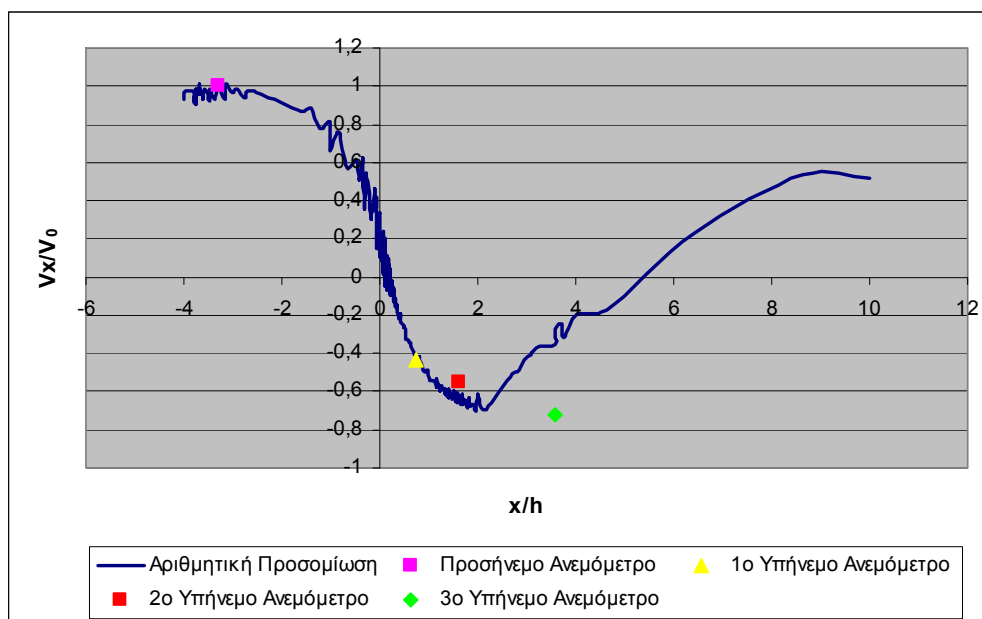


**Εικόνα 38.** Έλεγχος της προστατευτικής ικανότητας του πλαισίου ελαστικής στήριξης: α) Αριθμητική προσομοίωση, β) Πλήρους κλίμακας πείραμα για ακίνητο πλαίσιο, γ) Πλήρους κλίμακας πείραμα για πλαίσιο ελαστικής στήριξης. Περίπτωση μη περατής κάλυψης πλαισίου ελαστικής στήριξης.

Στην *Εικόνα 39* παρουσιάζονται καθ' όλο το μήκος της ανεμοσήραγγας της αριθμητικής προσομοίωσης και για ύψος ίσο με το μισό του πλαισίου ( $z=1.5m$ ), οι κανονικοποιημένες τιμές των ταχυτήτων (λόγος ταχυτήτων στην ουσία) με την ταχύτητα σε θέση  $10m$  προσήνεμα του πλαισίου ελαστικής στήριξης (όπως και στο πλήρους κλίμακας πείραμα). Το μήκος της ανεμοσήραγγας έχει κανονικοποιηθεί με το ύψος του πλαισίου, δηλαδή  $h=3m$ , ενώ ως θέση μηδέν έχει οριστεί η θέση του

πλαisiού. Η *Εικόνα 39* παρουσιάζει μια γενικότερη ποιοτική απεικόνιση του τρόπου μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου στην υπήνεμη περιοχή του πλαisiού. Με χρωματιστά σημεία δίνονται τα αποτελέσματα του πλήρους κλίμακας πειράματος όπως μετρήθηκαν με τη βοήθεια των περιστροφικών ανεμομέτρων (αποτελέσματα *Εικόνας 38γ*). Επιβεβαιώνεται η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων κυρίως σε μεγάλες αποστάσεις..

Στην πραγματικότητα αυτό που συμβαίνει είναι η αδυναμία της υπολογιστικής μεθόδου να απεικονίσει σωστά το μέγεθος του στροβίλου στην υπήνεμη περιοχή του πλαisiού. Αυτό αποδεικνύεται κυρίως από το αποτέλεσμα του υπήνεμου ανεμομέτρου σε απόσταση  $10m$ . Ενώ οι τιμές λόγου ταχυτήτων για τα δυο πρώτα ανεμόμετρα είναι σε σχετική συμφωνία με το πείραμα, ο λόγος ταχυτήτων για το τρίτο ανεμόμετρο είναι πολύ μακριά από το μετρούμενο αποτέλεσμα. Το πεδίο ροής της υπολογιστικής προσομοίωσης δίνει στη θέση αυτή το κέντρο του στροβίλου (όπου οι ταχύτητες αποκτούν μικρές τιμές), παρουσιάζοντας τον μειωμένου μήκους, ενώ στην πραγματικότητα είναι πιο επιμήκης. Ο στρόβιλος εκτιμάται από την αριθμητική προσομοίωση ότι καταλαμβάνει την περιοχή των αρνητικών ταχυτήτων. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της *Εικόνας 39* ο στρόβιλος καταλαμβάνει την υπήνεμη περιοχή μέχρι την απόσταση  $18m$  ( $6h$ ) (στο σημείο αυτό παύουν οι αρνητικές ταχύτητες). Αυτό βρίσκει αντίθετες προηγούμενες πειραματικές μελέτες [29, 33, 38] οι οποίες υπολογίζουν το μήκος αυτό να είναι από  $9h - 15h$  (*Παράγραφος 1.4.2*), όπως φαίνεται και από τις παρούσες πειραματικές μετρήσεις. Το συμπέρασμα είναι πως η αριθμητική προσομοίωση απεικονίζει το στρόβιλο στην υπήνεμη περιοχή του πλαisiού μικρότερου μήκους από ότι πραγματικά είναι.



**Εικόνα 39.** Σύγκριση της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου μεταξύ αριθμητικής προσομοίωσης και πλήρους κλίμακας πειράματος. Μη περατή κάλυψη πλαisiού ελαστικής στήριξης.

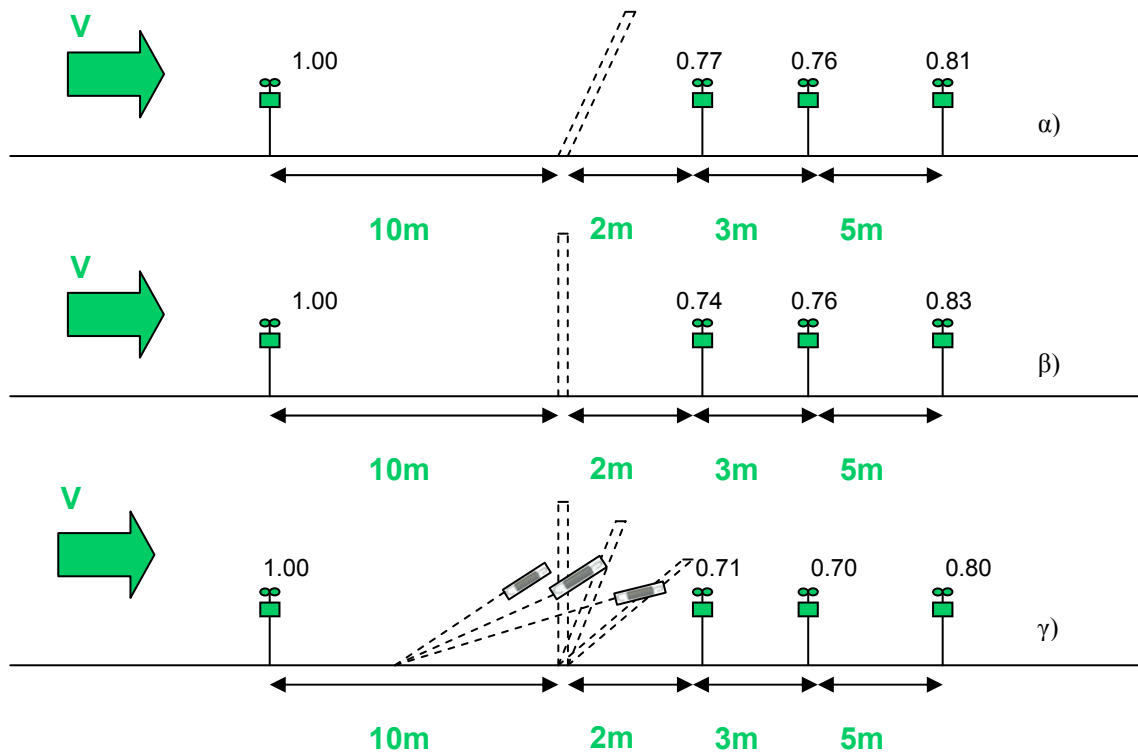
Αυτό που αξίζει να παρατηρηθεί στην *Εικόνα 38β* και *38γ* και δεν θεωρείτο αναμενόμενο είναι τα αποτελέσματα του πλήρους κλίμακας πειράματος για το πλαίσιο με ελαστική στήριξη συγκριτικά με το ακίνητο πλαίσιο. Θεωρούνταν δεδομένο πως το πλαίσιο ελαστικής στήριξης δεν θα παρείχε αρκετά καλή προστασία της υπήνεμης πλευράς του λόγω της κίνησης του αυτής. Αντί αυτού στις δυο

προαναφερθείσες απεικονίσεις της *Εικόνας 38* ( $\beta$  και  $\gamma$ ) διαφαίνεται πως το πλαίσιο ελαστικής στήριξης παρουσιάζει καλύτερη προστατευτική ικανότητα σε κάθε μια από τις θέσεις όπου γίνανε μετρήσεις στην υπήνεμη περιοχή του (και στις τρεις υπήνεμες θέσεις όπου τοποθετήθηκαν ανεμόμετρα) όσο αφορά τη μείωση των ταχυτήτων. Αυτό αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της κατασκευής το οποίο δεν είχε προβλεφθεί κατά το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης. Η μείωση αυτή των ταχυτήτων μπορεί μόνο να αποδοθεί στην απόσβεση της κινητικής ενέργειας του ανέμου η οποία προέρχεται από τη δυναμική του φαινομένου.

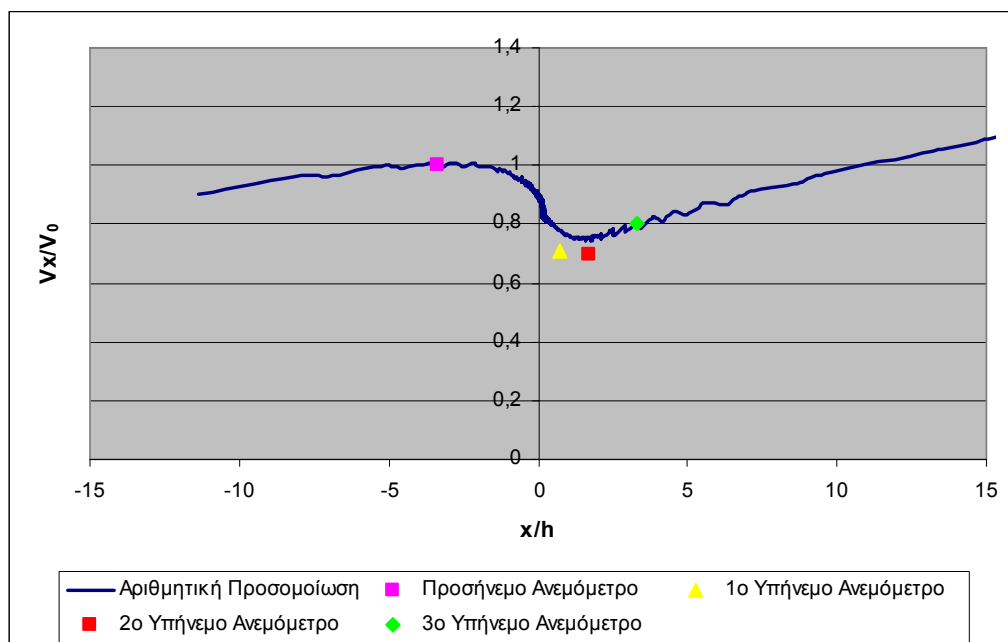
Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην *Εικόνα 40* για το πλαίσιο ελαστικής στήριξης με κάλυψη γεωργικού δίχτυου με τιμή πορώδους 62%. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούμε μια συμφωνία των λόγων των ταχυτήτων και για τις τρεις περιπτώσεις. Αρχικά δεν παρατηρούνται οι αποκλίσεις που υπήρχαν στην περίπτωση της μη περατής κάλυψης όσο αφορά τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης και του πλήρους κλίμακας πειράματος. Η χρήση δίχτυων, όπως μελετήθηκε και παρουσιάστηκε στο δεύτερο τμήμα της διατριβής, εξομαλύνει τη ροή και αποσβένει τα τυρβώδη φαινόμενα με αποτέλεσμα την σωστή απεικόνιση της ροής από το αριθμητικό μοντέλο.

Επίσης δεν υπάρχουν διαφορές είτε το πλαίσιο είναι ακίνητο είτε είναι ελαστικά στηριζόμενο (με συνέπεια να του επιτρέπεται η μετατόπιση μέσω στροφής). Αυτό οφείλεται στο πορώδες του υλικού κάλυψης (γεωργικό δίχτυ με τιμή πορώδους 62%). Στην περίπτωση όμως που γίνεται χρήση ενός τέτοιου δίχτυου, η πιθανή μείωση των πιέσεων πάνω στο πλαίσιο ελαστικής στήριξης καθιστούν πιο πλεονεκτική την κατασκευή και χρήση ενός τέτοιου πλαισίου ελαστικής στήριξης παρά ενός σταθερού, από τη στιγμή που η προστατευτική ικανότητα δεν επηρεάζεται. Η άποψη αυτή είναι καθαρά ερευνητική από τη στιγμή που η επιλογή ενός πλαισίου θα στηριχθεί εξίσου και στο κόστος που απαιτείται.

Η *Εικόνα 41* δίνει συνολικά τις μεταβολές των ταχυτήτων κατά όλο το μήκος της ανεμοσήραγγας στην αριθμητική προσομοίωση και για ύψος ίσο με το μισό του πλαισίου ελαστικής στήριξης ( $z=1.5m$ ), για την περίπτωση περατής κάλυψης. Για ένα τέτοιας κάλυψης πλαίσιο δεν παρατηρούνται καθόλου αρνητικές ταχύτητες υπήνεμα του πλαισίου, απόδειξη της απουσίας σημαντικών τυρβωδών φαινομένων. Το μήκος της ανεμοσήραγγας έχει και κανονικοποιηθεί με το ύψος  $h=3m$  της κατασκευής και ως θέση μηδέν έχει οριστεί η θέση του πλαισίου. Με χρωματιστά σημεία παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα του πλήρους κλίμακας πειράματος για το πλαίσιο με ελαστική στήριξη (*Εικόνα 40γ*).



**Εικόνα 40.** Έλεγχος της προστατευτικής ικανότητας του πλαισίου ελαστικής στήριξης: α) Αριθμητική προσομοίωση, β) Πλήρους κλίμακας πείραμα για ακίνητο πλαίσιο, γ) Πλήρους κλίμακας πείραμα για πλαίσιο ελαστικής στήριξης. Περίπτωση περατής κάλυψης πλαισίου ελαστικής στήριξης με τη χρήση γεωργικού δικτύου τιμής πορώδους 62%.



**Εικόνα 41.** Σύγκριση της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου μεταξύ αριθμητικής προσομοίωσης και πλήρους κλίμακας πειράματος. Περατή κάλυψη πλαισίου ελαστικής στήριξης γεωργικού δικτύου (62% πορώδες).

### 3.6.2 Χρήση της αριθμητικής προσομοίωσης για τον υπολογισμό των πιέσεων και των εντατικών μεγεθών πάνω στο πλαίσιο ελαστικής στήριξης.

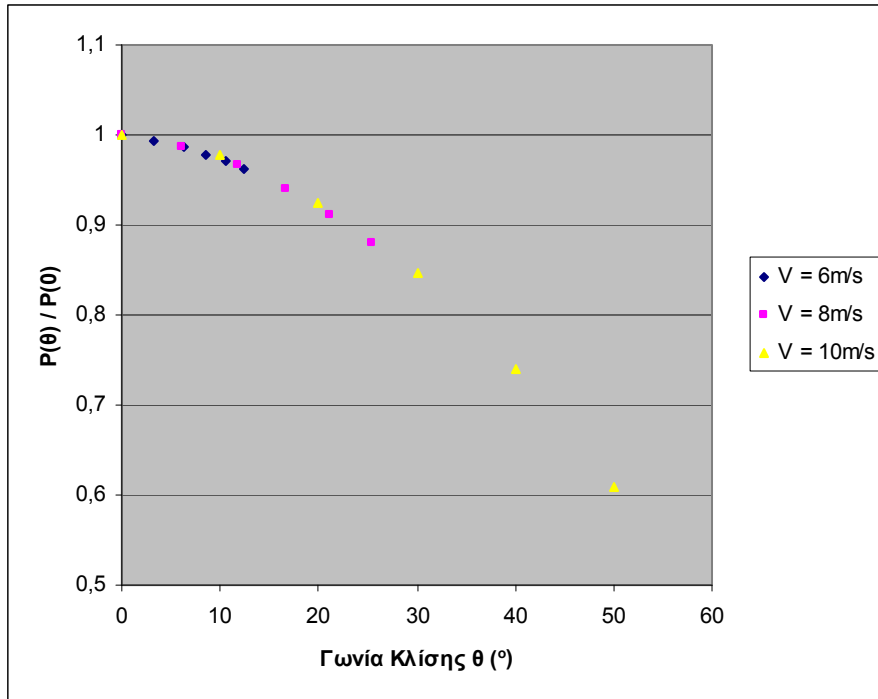
Από τη στιγμή που το μοντέλο της αριθμητικής προσομοίωσης κρίθηκε αξιόπιστο, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των πιέσεων πάνω στο πλαίσιο όπως και για την εκτίμηση των εντατικών μεγεθών και για τις δυο περιπτώσεις κάλυψης. Βασικός λόγος για τον οποίο συνεχίζεται η ανάλυση με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου είναι ότι μπορούμε να πραγματοποιήσουμε οποιεσδήποτε αλλαγές θέλουμε και κυρίως να μελετήσουμε μεγαλύτερες γωνίες ισορροπίας από αυτές που μας έδιναν τα πειράματα πλήρους κλίμακας, λόγω περιορισμών στην αντοχή των ελατηρίων και τον κίνδυνο πλαστικών παραμορφώσεων.

Στην *Εικόνα 42* δίδεται η σχέση της μειωμένης ανεμοπίεσης σε σχέση με την ανεμοπίεση της αρχικής κάθετης θέσης του πλαισίου με μη περατή κάλυψη ως προς το επίπεδο του εδάφους  $P(\theta=0)$ , για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Για μικρές ταχύτητες και συγκεκριμένη ελαστικότητα είναι λογικό η απόκριση της κατασκευής να είναι μικρότερη αυτής στην περίπτωση μεγαλύτερης ταχύτητας ανέμου. Παρόλα αυτά και στις τρεις περιπτώσεις υπάρχει εμφανής μείωση της ανεμοπίεσης πάνω στο πλαίσιο. Η περίπτωση που ενδιαφέρει ιδιαίτερα είναι αυτή της μεγαλύτερης ταχύτητας. Η μείωση είναι έντονη αγγίζοντας το 15% στην κλίση  $30^\circ$  και φτάνει μέχρι και 40% περίπου για γωνία κλίσης  $50^\circ$ . Ο λόγος της μειωμένης πίεσης πλαισίου με ελαστική στήριξη ως προς την ανεμοπίεση άκαμπτου πλαισίου ακολουθεί μια συγκεκριμένη παραβολική καμπύλη η οποία μπορεί να υπολογιστεί για κάθε γωνία από την παρακάτω σχέση:

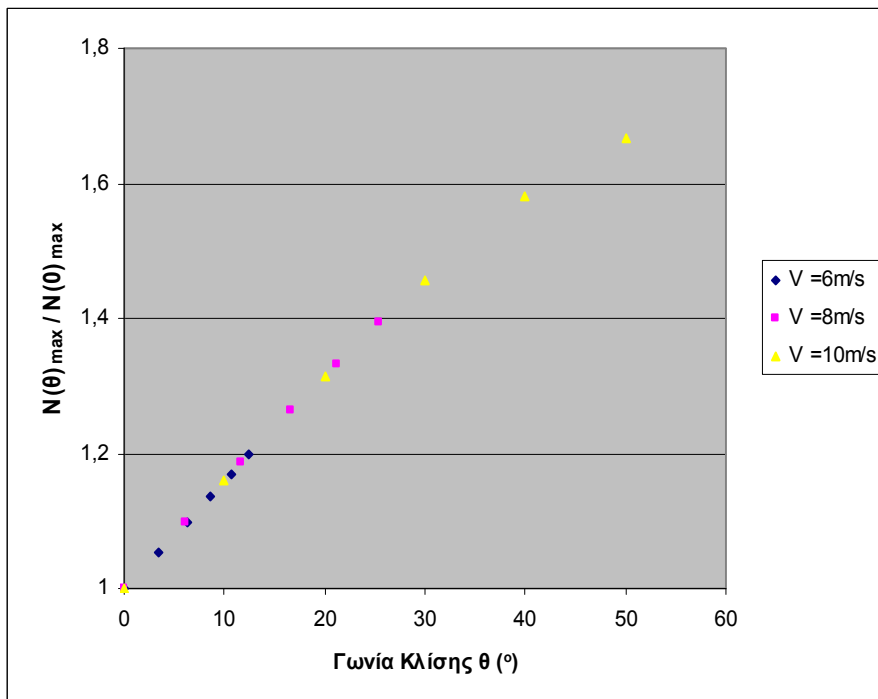
$$\frac{P(\theta)}{P(0)} = -0.0001\theta^2 - 0.0011\theta + 1.0 \quad (21)$$

Δεν πρέπει βέβαια να παραλειφθεί και η ανάγκη ταυτόχρονης αποτελεσματικής προστασίας της υπήνεμης περιοχής η οποία πιθανό να χάνεται καθώς το πλαίσιο πηγαίνει σε πολύ υψηλές κλίσεις ( $\theta > 50^\circ$ ). Παρόλα αυτά ένα πλαίσιο με γωνία κλίσης της κατασκευής, μέσα στα όρια της παρούσας ανάλυσης, μπορεί να αποδίδει σημαντικά στο θέμα της προστασίας και παράλληλα να δέχεται πολύ μειωμένη επιβάρυνση φορτίων ανέμου με αντίστοιχη μείωση κόστους.

Η εφαρμογή ελαστικής στήριξης στην κατασκευή του πετάσματος προκαλεί και μείωση των εντατικών μεγεθών σχεδιασμού, αντίστοιχη της μείωσης των ανεμοπιέσεων. Για μια δεδομένη γωνία κλίσης ισορροπίας που αποκτά το πλαίσιο υπό την πίεση του ανέμου παρουσιάζεται μείωση στις τέμνουσες δυνάμεις και ροπές κάμψης που ασκούνται στα δομικά στοιχεία της ελαστικά στηριζόμενης κατασκευής ανάλογη της μείωσης των ανεμοπιέσεων. Αυτό συμβαίνει διότι οι σχέσεις των πιέσεων ανέμου και των συγκεκριμένων εντατικών μεγεθών είναι γραμμικές, αφού το σύστημά στήριξης, αποτελούμενο από ελατήρια, είναι γραμμικά ελαστικό. Άρα οι μειώσεις των εντατικών μεγεθών σχεδιασμού τεμνουσών δυνάμεων και ροπών κάμψης είναι ακριβώς ίδιες και εξίσου σημαντικές με τις μειώσεις των ανεμοπιέσεων (*Εικόνα 42*).



**Εικόνα 42.** Λόγος μειωμένης πίεσης πλαισίου με ελαστική στήριξη ως προς την ανεμοπίεση άκαμπτου πλαισίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης  $\theta$ , για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Περίπτωση κάλυψης μη περατού υλικού.



**Εικόνα 43.** Μεταβολή των μέγιστων τιμών των αξονικών δυνάμεων συναρτήσει της γωνίας κλίσης  $\theta$ , για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Κάλυψη μη περατού υλικού.

Σε αντίθεση με τις ανεμοπιέσεις και τις τέμνουσες δυνάμεις και ροπές κάμψης, οι αξονικές δυνάμεις των δομικών στοιχείων του πλαισίου αυξάνουν με την αύξηση της κλίσης ισορροπίας (Εικόνα 43). Ο λόγος για την συμπεριφορά αυτή είναι ότι η

συνιστώσα του ελατηρίου που καταπονεί αξονικά το πλαίσιο αυξάνει λόγω μείωσης της γωνίας μεταξύ ελατηρίου και πετάσματος, με την αύξηση της κλίσης ισορροπίας. Όμως, μόνο αν οι αξονικές δυνάμεις είναι σημαντικές μπορούν να επηρεάσουν το σχεδιασμό της κατασκευής και να υποσκιάσουν τις θετικές επιπτώσεις που προέρχονται από τη μείωση των ανεμοπιέσεων. Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης κατασκευής του πλαισίου ελαστικής στήριξης δεν επηρεάστηκε καθόλου από την αύξηση αυτή των αξονικών δυνάμεων για καμιά από τις περιπτώσεις κάλυψης που εξετάστηκαν.

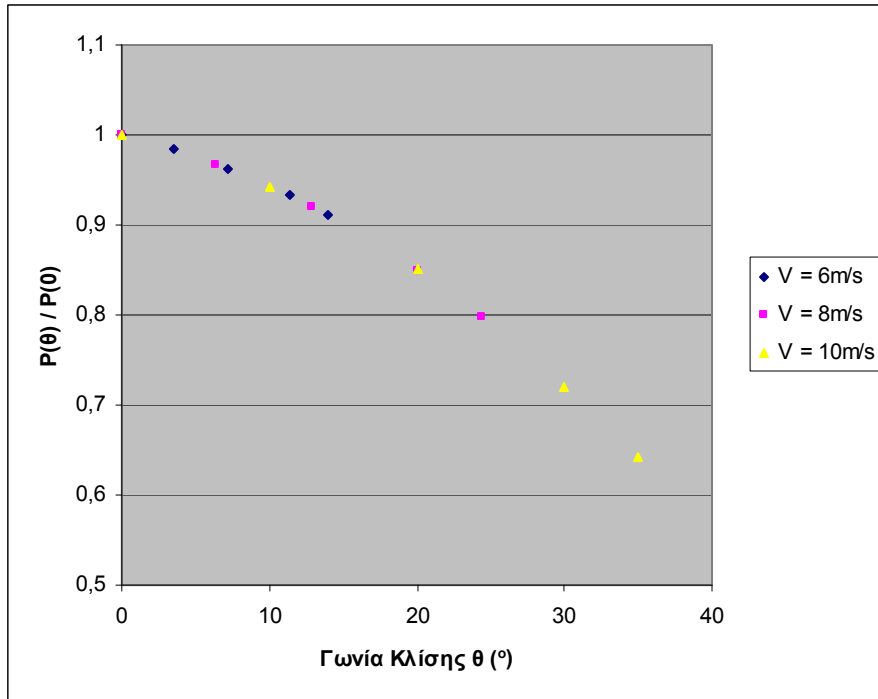
Στην *Εικόνα 44*, παρουσιάζεται ο λόγος της μειωμένης πίεσης πλαισίου με ελαστική στήριξη ως προς την ανεμοπίεση άκαμπτου πλαισίου με κάλυψη περατού υλικού. Κι εδώ έχουν εξετασθεί τρεις περιπτώσεις ταχυτήτων προσπίπτοντος ανέμου όπως και στην περίπτωση της μη περατής κάλυψης, δηλαδή  $6m/s$ ,  $8m/s$  και  $10m/s$ . Κι εδώ για τη μικρότερη υπό εξέταση τιμή ταχύτητας οι μεταβολές στην πίεση δεν είναι αρκετά σημαντικές μη ξεπερνώντας την τιμή του  $10\%$ . Για μεγαλύτερες ταχύτητες και κυρίως για την ταχύτητα ίση με  $10m/s$  οι μεταβολές γίνονται αρκετά σημαντικές. Για ταχύτητα  $8m/s$  η κλίση του πλαισίου αγγίζει τις  $25^\circ$  με μια μείωση στην ανεμοπίεση που το πλαίσιο δέχεται ίση με  $20\%$ . Για ταχύτητα  $10m/s$  η μείωση αυτή φτάνει το  $28\%$  για κλίση ίση με  $30^\circ$ , ενώ το  $35\%$  για κλίση ίση με  $35^\circ$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι στις αντίστοιχες γωνίες ισορροπίας το αδιαπέραστο πλαίσιο παρουσίαζε μικρότερες μειώσεις της πίεσης. Ο λόγος της μειωμένης πίεσης πλαισίου με ελαστική στήριξη ως προς την ανεμοπίεση άκαμπτου πλαισίου ακολουθεί για την περίπτωση του ελαστικής στήριξης πλαισίου την εξής παραβολική καμπύλη:

$$\frac{P(\theta)}{P(0)} = -0.0002\theta^2 - 0.0045\theta + 1.0 \quad (22)$$

Οι γωνίες κλίσης που μελετήθηκαν ήταν μέχρι  $35^\circ$ , όπου η συγκεκριμένη γωνία προέκυπτε από ταχύτητα ανέμου ίση με  $10m/s$ . Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη γωνία κλίσης έπρεπε να γίνει χρήση ελατηρίων με πολύ μικρή ελαστική σταθερά. Στην περίπτωση αυτή όμως οι δυνάμεις επαναφοράς δεν μπορούσαν να ανταπεξέλθουν την ανεμοπίεση στο πλαίσιο με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ύπαρξη ισορροπίας σε μεγαλύτερες γωνίες. Για αυτές τις γωνίες κλίσης το πλαίσιο ήταν μέσα στα όρια που ορίστηκαν στο μη περατό πλαίσιο ελαστικής στήριξης ( $\theta < 50^\circ$ ) όσο αφορά την προστατευτική ικανότητα και όπως υπολογίστηκε υπάρχουν εξίσου σημαντικές μεταβολές στην πίεση που το πλαίσιο δέχεται καθώς αυτό ισορροπεί σε διάφορες γωνίες κλίσης.

Να σημειωθεί πως και στην περίπτωση του περατού πλαισίου οι τέμνουσες δυνάμεις καθώς και οι ροπές έχουν ακριβώς τις ίδιες και εξίσου σημαντικές μεταβολές με τις πιέσεις. Όπως προαναφέρθηκε το γραμμικά ελαστικό σύστημα στήριξης, λόγω της ύπαρξης των ελατηρίων, επιφέρει τη γραμμικότητα ανάμεσα στη σχέση των πιέσεων με τις τέμνουσες δυνάμεις αλλά και τις ροπές. Είναι συνεπώς αρκετό να επισημανθεί πως συνολικά τα συγκεκριμένα εντατικά μεγέθη εμφανίζουν σημαντικές μειώσεις, στα ποσοστά που ανωτέρω αναφέρθηκαν, κατά τη λειτουργία της ιδιαίτερης αυτής κατασκευής.





**Εικόνα 44.** Λόγος μειωμένης πίεσης πλαισίου με ελαστική στήριξη ως προς την ανεμοπίεση άκαμπτου πλαισίου συναρτήσεως της γωνίας κλίσεως  $\theta$ , για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Περίπτωση κάλυψης περατού υλικού Scirocco50 (62% πορώδες).

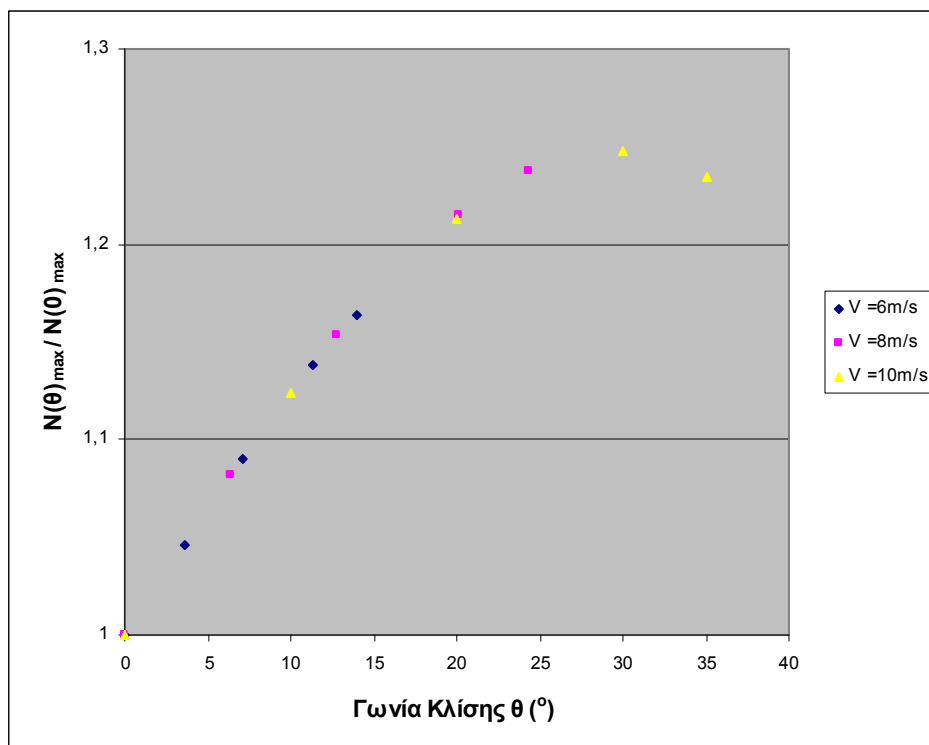
Οι αξονικές δυνάμεις χρήζουν παρατήρησης στην περίπτωση του ελαστικά στηριζόμενου πλαισίου με κάλυψη περατού υλικού. Στην περίπτωση της μη περατής κάλυψης οι αξονικές δυνάμεις παρουσιάζονται να αυξάνονται συνεχώς κατά την αύξηση της γωνίας κλίσεως ισορροπίας  $\theta$  (Εικόνα 43). Στην παρούσα όμως ανάλυση, για το περατό πλαίσιο ελαστικής στήριξης (Εικόνα 45), οι αξονικές δυνάμεις αυξάνουν μέχρι την γωνία των  $30^\circ$  και στην συνέχεια παρουσιάζει πτώση. Επίσης η μέγιστη τιμή που οι αξονικές δυνάμεις αποκτούν αγγίζει μια αύξηση κοντά στο 25% σε σχέση με ένα άκαμπτο πλαίσιο τη στιγμή που για το μη περατό πλαίσιο η αύξηση αυτή ήταν πάνω από 40% για την ίδια γωνία ισορροπίας ( $30^\circ$ ).

Στην ουσία ο τρόπος μεταβολής των αξονικών δυνάμεων πάνω στο πλαίσιο είναι ο ίδιος ανεξάρτητα από την κάλυψη που χρησιμοποιούμε. Αυτό ισχύει από τη στιγμή που η κατασκευή παραμένει ως έχει και οι στηρίξεις δεν υπόκεινται σε καμιά μεταβολή. Η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων ακολουθεί μια σχέση της μορφής:

$$N(\theta, P(\theta)) = 2.12P(\theta) \cot\left(\frac{90 - \theta}{2}\right) \quad (23)$$

Η μεταβολή των αξονικών δυνάμεων οφείλεται στις ανεμοπιέσεις  $P(N/m)$  που καταπονούν την κατασκευή και στην γωνία κλίσεως  $\theta(^\circ)$  που αυτή αποκτά στην ισορροπία του συστήματος. Και στις δυο περιπτώσεις πλαισίου ελαστικής στήριξης διαφορετικής κάλυψης που μελετήθηκαν, η καμπύλη που αντιπροσωπεύει τις αξονικές δυνάμεις φτάνει σε ένα μέγιστο και από εκεί και ύστερα οδηγείται στη μείωση. Αυτό προκύπτει από το συνδυασμό των συντελεστών της Εξίσωσης 23 αλλά και της γωνίας  $\theta$ . Στην περίπτωση του μη περατού υλικού το μέγιστο της καμπύλης των αξονικών δυνάμεων δεν έχει επιτευχθεί για τις υπό εξέταση γωνίες (έως και  $50^\circ$ )

και τοποθετείται σε γωνία ισορροπίας κοντά στις  $65^\circ$ . Για το λόγο αυτό και δεν εμφανίζεται στην *Εικόνα 43*. Αντίθετα, για την κάλυψη μη περατού υλικού η καμπύλη των αξονικών δυνάμεων αποκτά το μέγιστό της σε γωνία ισορροπίας ίση με  $30^\circ$  και μετέπειτα οι αξονικές δυνάμεις μειώνονται.



**Εικόνα 45.** Μεταβολή των μέγιστων τιμών των αξονικών δυνάμεων συναρτήσει της γωνίας κλίσης  $\theta$ , για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Κάλυψη περατού υλικού Scirocco MD (62% πορώδες).

Το γενικότερο συμπέρασμα όλων των παραπάνω είναι πως το πλαίσιο με περατή κάλυψη παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που το αντίστοιχο πλαίσιο μη περατής κάλυψης δεν εμφανίζει. Για το περατής κάλυψης πλαίσιο και για ίσες τιμές γωνίας ισορροπίας με το μη περατό, οι πιέσεις (και κατ' επέκταση οι τέμνουσες δυνάμεις και ροπές) εμφανίζουν πιο έντονο ρυθμό μείωσης, οι αξονικές δυνάμεις παρουσιάζουν αύξηση με χαμηλότερο όμως ρυθμό αύξησης (μέχρι μια συγκεκριμένη γωνία κλίσης). Το μέγεθος των συγκεκριμένων αξονικών δυνάμεων δεν φαίνεται να έχει επιπτώσεις στο σχεδιασμό του πλαισίου και επομένως δεν επηρεάζει τα πλεονεκτήματα από την μείωση των εντατικών μεγεθών των ροπών και τεμνουσών δυνάμεων.

#### **4. Δυσδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των φορτίων ανέμου και εύκαμπτων περατών και μη πλαισίων**

##### **4.1 Γενικά**

Στις προηγούμενες παραγράφους του τρίτου τμήματος της διατριβής παρουσιάστηκε η προσομοίωση ενός δυναμικού φαινομένου και συγκεκριμένα της ανταπόκρισης περατών και αδιαπέραστων πλαισίων με ελαστική στήριξη σε ανεμοπιέσεις και της αλληλεπίδρασης τους με τα φορτία ανέμου. Η προσομοίωση του δυναμικού φαινομένου υλοποιήθηκε με τη βοήθεια α) ενός αριθμητικού μοντέλου CFD πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της επίδρασης του ανέμου πάνω στο πλαίσιο (υπολογισμός φορτίων ανέμου), και στη συνέχεια β) μη γραμμικής ανάλυσης η οποία έδινε κάθε φορά τη νέα θέση ισορροπίας του πλαισίου για συγκεκριμένη ανεμοπίεση. Η διαδικασία συνεχιζόταν με νέο υπολογισμό τροποποιημένων ανεμοπιέσεων για τη επόμενη θέση του κεκλιμένου πλαισίου, και πάλι νέας θέσης του πλαισίου από τις νέες ανεμοπιέσεις, μέχρι επίτευξης τελικής σύγκλισης. Με τον τρόπο αυτό υπολογιζόταν για κάθε ταχύτητα του ανέμου (και αντίστοιχα ανεμοπίεση) η γωνία κλίσης του πλαισίου ελαστικής στήριξης. Λόγω υψηλών απαιτήσεων σε υπολογιστικό χρόνο δεν πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του συνολικού δυναμικού φαινομένου αλλά ακολουθήθηκε ο προαναφερθείς έμμεσος τρόπος αλληλεπίδρασης. Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσέγγισης ήταν πλήρως ικανοποιητικά και η σύνθετη ανάλυση αριθμητικής προσομοίωσης ανεμοπίεσης – μη-γραμμικής ανάλυσης μέγιστων μετατοπίσεων απεικόνισε πλήρως το δυναμικό φαινόμενο, για δυο μάλιστα περιπτώσεις, περατής ή μη περατής κάλυψης του πλαισίου.

Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της συνδυασμένης ανάλυσης υπολογιστικής ρευστομηχανικής και μη-γραμμικής αριθμητικής στατικής ανάλυσης για μεγάλες μετατοπίσεις με παράλληλα πειράματα πλήρους κλίμακας κατέδειξε την αξιοπιστία της χρήσης της αριθμητικής προσομοίωσης για την ανάλυση αντίστοιχων δυναμικών φαινομένων. Συγκεκριμένα, ένας από τους αρχικούς στόχους της διατριβής ήταν η προσομοίωση και μελέτη κατακόρυφων πλαισίων τα οποία παρουσιάζουν σημαντική καμπτική παραμόρφωση κάτω από ανεμοπιέσεις. Αυτό προϋποθέτει τη χρήση ενός εύκαμπτου υλικού για την κατασκευή του πλαισίου. Η αρχική ιδέα ήταν η δημιουργία ενός πλαισίου που θα είναι δυνατό να συμπεριφέρεται, καθώς αλληλεπιδρά με τον άνεμο, όπως οι φυσικοί ανεμοφράκτες από δέντρα, δηλαδή να συμπεριφέρεται «έξυπνα» και να μπορεί να αποσβένει τα φορτία ανέμου με τη βοήθεια της ίδιας του της μηχανικής καμπτικής απόκρισης. Η απόσβεση αυτή αποτελεί ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα από τη στιγμή που συνδυάζεται με σημαντικές μειώσεις στα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται πάνω στο πλαίσιο και επομένως στο κόστος.

Η ανάλυση που ακολουθεί μελετά την αλληλεπίδραση με τον προσπίπτοντα άνεμο ενός εύκαμπτου πλαισίου, πακτωμένου στη βάση του. Για τους σκοπούς της ανάλυσης έγινε επιλογή υλικού *Plexiglas* (η επιλογή του υλικού αποτελεί παράδειγμα θεωρητικό αποκλειστικά που εξυπηρετεί τους σκοπούς της ανάλυσης στην συγκεκριμένη περίπτωση). Και στην παρούσα φάση δεν πραγματοποιήθηκε συνολική προσομοίωση του δυναμικού φαινομένου λόγω του χρονοβόρου μιας τέτοιας υπολογιστικής διαδικασίας. Η μελέτη πραγματοποιείται με τη βοήθεια αριθμητικής προσομοίωσης του ρευστοδυναμικού προβλήματος αλλά και της κάμψης (απόκριση του ελαστικού πλαισίου) κάθε φορά. Για ορισμένη κατανομή ταχύτητας ανέμου

υπολογίζονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οι θέσεις ισορροπίας του εύκαμπτου πλαισίου.

Η κατανομή των ανεμοπιέσεων διορθώνεται με ρευστοδυναμική αριθμητική προσομοίωση (CFD) για κάθε νέα θέση ισορροπίας κάμψης του πλαισίου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Όταν επιτευχθεί σύγκλιση υπολογίζονται οι τιμές των μέγιστων δυνάμεων και ροπών στο πλαίσιο και συγκρίνονται με τα εντατικά μεγέθη ενός αντίστοιχου πλαισίου κατασκευασμένου από μη εύκαμπτο υλικό, συγκεκριμένα χάλυβα, υπό τη ίδια δράση ανέμου (ένταση και κατανομή ταχυτήτων ανέμου). Η προσομοίωση του δυναμικού φαινομένου πραγματοποιείται και για την περίπτωση περατού εύκαμπτου υλικού η οποία στη συνέχεια συγκρίνεται με τα αποτελέσματα του μη περατού.

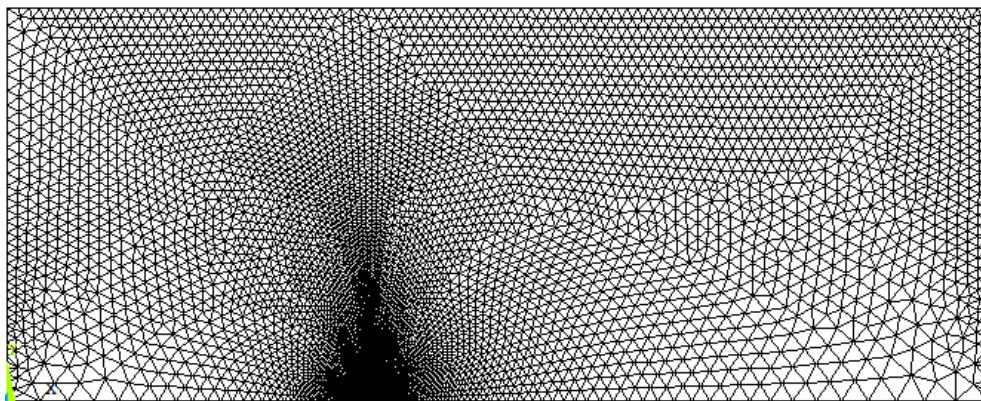
Επειδή όμως ένα κατακόρυφο πλαίσιο πρέπει να διατηρεί τον προστατευτικό ρόλο του, εξετάζεται σε κάθε περίπτωση και η επίδραση της απόκρισης ελαστικής κάμψης του πλαισίου στην προστασία που παρέχει στην υπήνεμη πλευρά του. Συνδυαστικά η αναμενόμενη σημαντική μείωση των εντατικών μεγεθών και η σχετικά μικρή επίδραση στην μείωση της προστατευτικής ικανότητας εκτιμάται ότι μπορεί να αναδείξει το όφελος από τη χρήση μιας τέτοιας ιδιαίτερης κατασκευής.

#### **4.2 Αριθμητική Προσομοίωση του προβλήματος**

Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε υπολογιστικά με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS-FLOTRAN και κατ' επέκταση με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που το υπολογιστικό αυτό πρόγραμμα χρησιμοποιεί. Όπως και στην *Παράγραφο 3.2*, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πετάσματος δυο διαστάσεων και θεωρήθηκε πως η διάταξη αυτή βρίσκεται σε μια δυσδιάστατη επίσης ορθογώνια ανεμοσήραγγα. Το πλέγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η διάταξη στο σύνολό της (ανεμοσήραγγα και πλαίσιο) αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό στοιχείων (elements) για κάθε ενδιάμεσο στάδιο υπολογισμού της ανεμοπίεσης σαν αποτέλεσμα της αντίστοιχης απόκρισης του εύκαμπτου πλαισίου που μελετήθηκε, μέχρι την σύγκλιση. Στην περίπτωση του μη περατού πετάσματος χρησιμοποιήθηκαν 52822 στοιχεία, ενώ μοντέλο 56422 στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν για στην περίπτωση της προσομοίωσης του περατού εύκαμπτου πλαισίου.

Οι διαστάσεις της ανεμοσήραγγας ήταν  $100\text{ m}$  και  $40\text{ m}$  κατά τους  $x, y$  άξονες αντίστοιχα ή ισοδύναμα  $33,3\text{ h}$  και  $13,3\text{ h}$  κατά την παραπάνω αντιστοιχία, όπου  $h$  θεωρούμε το ύψος του πετάσματος,  $h = 3\text{ m}$ .

Τα στοιχεία τα οποία αποτελούσαν το πλέγμα στην αριθμητική προσομοίωση ήταν τριγωνικά. Μια απεικόνιση της δομής του πλέγματος της ανεμοσήραγγας παρουσιάζεται στην *Εικόνα 44*.

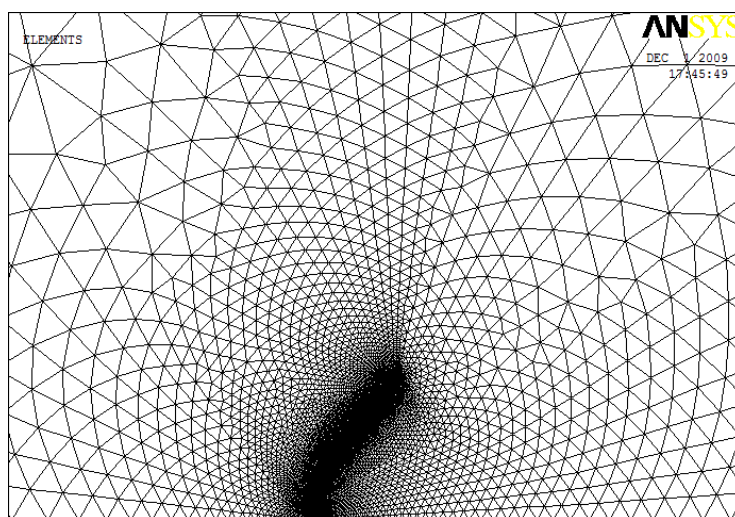


**Εικόνα 44.** Συνολική μορφή πλέγματος της ανεμοσήραγγας.

Στην *Εικόνα 44* παρουσιάζεται συνολικά το πλέγμα το οποίο έχει δομηθεί με τριγωνικά στοιχεία. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η δημιουργία του πλέγματος ήταν αντίστοιχος με κάθε άλλη αριθμητική προσομοίωση που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία. Αυτό συνεπάγεται την πύκνωση των στοιχείων κοντά σε θέσεις όπου είναι πιθανό να αναπτυχθούν τυρβώδη φαινόμενα.

Στην *Εικόνα 45* γίνεται εμφανής η δομή της διακριτοποίησης της περιοχής περί το εύκαμπτο πλαίσιο. Η εικόνα αυτή είναι μια μεγέθυνση του πλέγματος της *Εικόνας 44*, κοντά στην περιοχή του εύκαμπτου πλαισίου. Από την *Εικόνα 45* μπορεί να γίνει αντιληπτή η λογική διαφοροποίησης του πλέγματος, δηλαδή η ανάγκη εντονότερης διακριτοποίησης στην περιοχή του πετάσματος.

Τα εξωτερικά στοιχεία που καλύπτουν τα όρια της ανεμοσήραγγας έχουν μέγεθος  $1m$  ενώ αυτά στην εξωτερική επιφάνεια του πλαισίου  $0.005m$  (αλλά και στο εσωτερικό του πλαισίου όταν αυτό είναι περατό) ή αντίστοιχα αδιαστατοποιώντας με το ύψος  $h$  του πλαισίου  $0.33h$  και  $0.00167h$ . Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αυξάνοντας τα στοιχεία στο πλέγμα παρατηρήθηκαν μηδαμινές μεταβολές στα αποτελέσματα. Περαιτέρω πύκνωση κρίθηκε μη απαραίτητη.



**Εικόνα 45.** Μεγέθυνση του πλέγματος στην προσήνεμη και υπήνεμη περιοχή του πλαισίου.

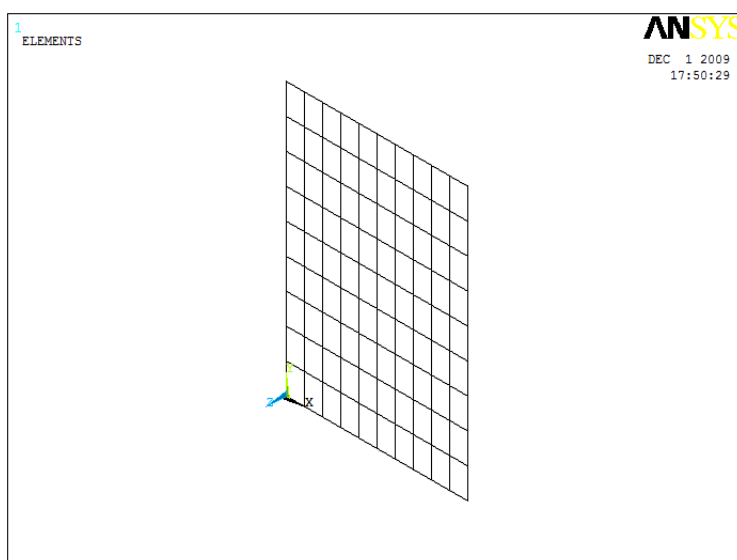
Τα φορτία ανέμου, μετά τον υπολογισμό τους (αναθεώρησή τους) με τη βοήθεια της ρευστοδυναμικής αριθμητικής προσομοίωσης για κάθε νέα θέση ισορροπίας ελαστικής κάμψης του πλαισίου μεταφερόντουσαν σαν νέα δεδομένα δράσης

ανεμοπιέσεων στην αριθμητική προσομοίωση, με μη-γραμμική ανάλυση, της κάμψης του εύκαμπτου πλαισίου για τον υπολογισμό της επόμενης «διορθωμένης» θέσης ισορροπίας του συστήματος. Για την καλύτερη παρατήρηση του φαινομένου, η προσομοίωση της κάμψης του πλαισίου πραγματοποιήθηκε σε ένα μοντέλο τριών διαστάσεων (Εικόνα 46). Το πλαίσιο είχε διαστάσεις 3m ύψος, 2m πλάτος και 0.01m (1cm) πάχος. Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση αυτή ήταν 90 (elements). Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στοιχεία κελύφους (Shell 63) τα οποία ορίζονται από τέσσερις κόμβους. Σε κάθε κόμβο αντιστοιχούν έξι βαθμοί ελευθερίας, τρεις για τις μετατοπίσεις (translations) κατά τις τρεις διευθύνσεις x,y,z και τρεις για στροφές (rotations) γύρω από κάθε άξονα x,y,z. Το στοιχείο αυτό υποστηρίζει προσομοίωση προβλημάτων κάμψης αλλά και την προσομοίωση μεταβολής γεωμετρίας λεπτών μεμβρανών.

#### 4.3 Μοντελοποίηση της τύρβης για το ρευστοδυναμικό μοντέλο

Το μοντέλο τύρβης το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην αριθμητική προσομοίωση του ρευστοδυναμικού προβλήματος είναι το μοντέλο *k-ε RNG*. Το μοντέλο αυτό είναι μια βελτιωμένη μορφή του συνήθους μοντέλου *k-ε* και προτιμήθηκε διότι το τελευταίο υπερεκτιμά σε πολλές περιπτώσεις τις τιμές της κινητικής ενέργειας της τύρβης, όπως σε ροές που προσπίπτουν σε εμπόδια και αντιμετωπίζει συγκεκριμένα, πρόβλημα στα σημεία όπου υπάρχουν απότομες μεταβολές στην κλίση της ταχύτητας (Awbi, 1991). Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από τον τρόπο με τον οποίο το ίδιο το μοντέλο αντιμετωπίζει τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας της τύρβης σε θερμότητα. Το μοντέλο *k-ε RNG* αντιμετωπίζει πιο αποτελεσματικά την μετατροπή της κινητικής ενέργειας της τύρβης σε θερμότητα. Δεν υποθέτει ομοιόμορφη απόσβεση των στροβίλων κάθε μεγέθους όπως το *standard k-ε*, αλλά κάποιοι στρόβιλοι φιλτράρονται.

Επίσης το *k-ε RNG* είναι ένα από τα μοντέλα που μπορεί να δώσει αποτελέσματα χωρίς να καταναλώνει σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, ανάλογα βέβαια με το εκάστοτε πρόβλημα.



**Εικόνα 46.** Το μοντέλο του τρισδιάστατου εύκαμπτου πλαισίου για την προσομοίωση της κάμψης του κατά την αλληλεπίδρασή του με τα διαδοχικά αναθεωρούμενα φορτία ανέμου μέχρι την επίτευξη σύγκλισης.

#### 4.4 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση των διαφόρων θέσεων ισορροπίας του πλαισίου ελαστικής στήριξης είναι πανομοιότυπες με τις συνθήκες προσομοίωσης των προηγούμενων υπό μελέτη προβλημάτων της παρούσας εργασίας και παρουσιάζονται αναλυτικά στην *Παράγραφο 2.5*. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στο στατικό μοντέλο ήταν πάκτωση του εύκαμπτου πλαισίου στο έδαφος.

#### 4.5 Αριθμητική προσομοίωση του ρευστοδυναμικού μοντέλου και της απόκρισης-κάμψης του πλαισίου.

Η υπολογιστική προσομοίωση δεν χρησιμοποιήθηκε για την ολοκληρωμένη απεικόνιση του δυναμικού φαινομένου των αλληλεπιδράσεων φορτίων ανέμου και απόκρισης της ελαστικής εύκαμπτης κατασκευής λόγω του υψηλού απαιτούμενου κόστους σε υπολογιστικό χρόνο. Ακολουθήθηκε μια συνδυαστική διαδικασία η οποία συμπεριλάμβανε την αριθμητική προσομοίωση του ρευστοδυναμικού μοντέλου τα αποτελέσματα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα ανεμοπίεσης στην αριθμητική ανάλυση της απόκρισης ελαστικής-κάμψης του πλαισίου μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης. Για την υπολογιστική προσομοίωση της κάμψης του πλαισίου ακολουθήθηκε μη-γραμμική ανάλυση Newton-Raphson (μεγάλες μετατοπίσεις) για τον υπολογισμό των εκάστοτε θέσεων ισορροπίας του κατά την αλληλεπίδρασή του με τα αναθεωρούμενα σε κάθε επανάληψη φορτία ανέμου.

Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις ενός σταθερής κατάστασης (steady state) μοντέλου εύκαμπτου πλαισίου, περατού και μη. Το ρευστοδυναμικό μοντέλο οδηγούσε στον υπολογισμό των πιέσεων πάνω στο εύκαμπτο πλαίσιο ενώ από την προσομοίωση της κάμψης εξαγόταν η νέα γεωμετρία που το πλαίσιο αποκτούσε για τις αντίστοιχες ανεμοπιέσεις. Οι τροποποιημένες πιέσεις μεταφερόντουσαν σαν νέο δεδομένο δράσεων στο μοντέλο αριθμητικής ανάλυσης της κάμψης και με τη μέθοδο Newton-Raphson (μη-γραμμική ανάλυση) μέσω της οποίας υπολογιζόταν κάθε φορά η διόρθωση στη ελαστική καμπύλη επιφάνεια του παραμορφωμένου πλαισίου. Η νέα γεωμετρία του εύκαμπτου πλαισίου εισερχόταν στο ρευστοδυναμικό μοντέλο και με τον τρόπο αυτό υπολογιζόντουσαν οι νέες διορθωμένες πιέσεις πάνω στο πλαίσιο. Βηματικά μετά από πολλές επαναλήψεις το πρόβλημα έφτανε σε σύγκλιση όπου η γεωμετρία του πλαισίου έπαυε να τροποποιείται (θέση ισορροπίας) όπως και τα φορτία ανέμου πάνω σε αυτό. Τα κριτήρια σύγκλισης ήταν τα εξής:

$$\Delta l_{n+1} - \Delta l_n \rightarrow 0$$

$$P_{n+1}(z) - P_n(z) \rightarrow 0 \quad (22)$$

Όπου  $\Delta l$  είναι το μέγιστο βέλος κάμψης του εύκαμπτου πλαισίου και  $P(z)$  η χαρακτηριστική τιμή της πίεσης που τα φορτία ανέμου προκαλούν πάνω στο πλαίσιο σε ύψος  $z$ . Η *Εξίσωση 22* δείχνει πως μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων ( $n+1$ ) πρέπει η πίεση και το βέλος κάμψης να παραμένουν αμετάβλητα ώστε να έχει επιτευχθεί η σύγκλιση του προβλήματος.

Για το περατό εύκαμπτο πλαίσιο ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια προαναφερθείσα διαδικασία. Το περατό υλικό προσομοιώθηκε στο ρευστοδυναμικό μοντέλο με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών ενός περατού γεωργικού δικτυού με τιμή πορώδους 46%. Η προσομοίωση των γεωργικών δικτύων έχει επίσης αναλυθεί και παρουσιαστεί διεξοδικά στις *Παραγράφους 2.3 & 2.6*. Πραγματοποιούνταν κάθε φορά ο υπολογισμός των νέων πιέσεων πάνω στο περατό υλικό του πλαισίου που ήταν σε κάμψη κάτω από τις ανεμοπιέσεις του προηγούμενου βήματος. Οι νέες πιέσεις εφαρμοζόντουσαν στην αριθμητική προσομοίωση της απόκρισης-κάμψης του ελαστικού πλαισίου για τη διόρθωση στη ελαστική καμπύλη επιφάνεια του παραμορφωμένου περατού πλαισίου. Με επαναλήψεις της διαδικασίας αυτής προσομοιώθηκε έμμεσα η αλληλεπίδραση ενός περατού εύκαμπτου πλαισίου (από υλικό *Plexiglas* για λόγους υπολογιστικούς), περατότητας ίσης με 46%.

Τα χαρακτηριστικά του εύκαμπτου υλικού *Plexiglas* αλλά και του χάλυβα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές προσομοιώσεις παρουσιάζονται στον *Πίνακα 11*:

**Πίνακας 11.** Χαρακτηριστικά του εύκαμπτου και δύσκαμπτου υλικού.

Υλικό εύκαμπτου πλαisiού	Μέτρο Ελαστικότητας $E$ (Pa)	Λόγος Poisson $\nu$
<i>Plexiglas</i>	$3.3 \cdot 10^9$	0.37
<i>Χάλυβας</i>	$210 \cdot 10^9$	0.31

#### 4.6 Αποτελέσματα

Μετά από τις απαιτούμενες επαναλήψεις σε κάθε περίπτωση, το πρόβλημα οδηγείται στη σύγκλιση και το σύστημα φτάνει σε ισορροπία αλληλεπίδρασης ανεμοπιέσεων και καμπτικής ελαστικής απόκρισης, μπορούν να υπολογιστούν τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην κατασκευή και να γίνει εμφανές αν μια τέτοια κατασκευή πλεονεκτεί, όσο αφορά την καταπόνηση που δέχεται από τον άνεμο, σε σχέση με μια αντίστοιχη δύσκαμπτη κατασκευή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκρίσεις των αποτελεσμάτων του εύκαμπτου πλαισίου με το αντίστοιχο πλαίσιο από δύσκαμπτο υλικό (χάλυβα). Επίσης παρουσιάζονται συγκρίσεις της συμπεριφοράς του περατού σε σχέση με το μη-περατό ελαστικό πλαίσιο και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης μιας τέτοιας ελαστικής κατασκευής με συγκεκριμένη τιμή πορώδους (46%).

##### 4.6.1. Σύγκριση εύκαμπτου μη περατού πλαισίου με αντίστοιχης γεωμετρίας δύσκαμπτο πλαίσιο.

Η αλληλεπίδραση του συστήματος άνεμος – εύκαμπτο πλαίσιο μελετήθηκε για διαφορετικές περιπτώσεις ταχύτητας αναφοράς του ανέμου (η ταχύτητα της λογαριθμικής κατανομής του ανέμου σε ύψος 10m από το έδαφος  $V_{10}$ ), για σταθερή ορισμένη τραχύτητα εδάφους  $z_0 = 0.05$ . Καθώς το υπό επίλυση πρόβλημα έφτανε στη σύγκλιση και το σύστημα σε θέση ισορροπίας, υπολογίζονταν οι ροπές κάμψης που καθ' ύψος αναπτύσσονται στο πλαίσιο. Οι σχετικοί υπολογισμοί έγιναν για τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικών εντάσεων ταχυτήτων της λογαριθμικής κατανομής. Η διάκριση ανάμεσα στην κάθε κατανομή γίνεται στη συνέχεια με βάση την τιμή της ταχύτητας αναφοράς στα 10m ύψος από το έδαφος. Έτσι ορίστηκαν τέσσερις

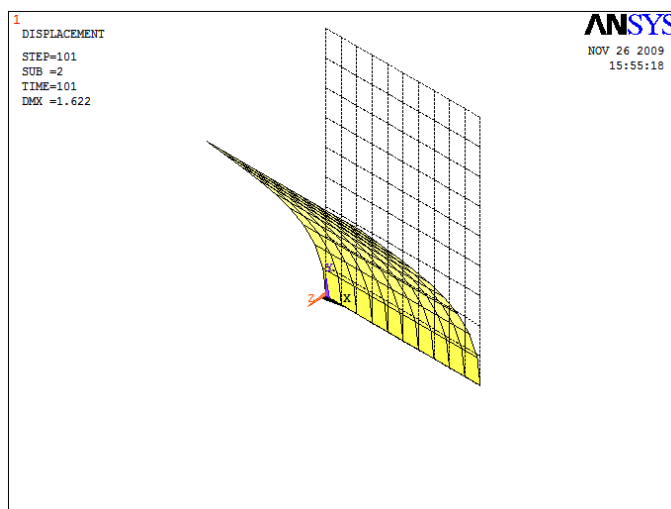


διαφορετικές τιμές για την ταχύτητα αναφοράς ανέμου  $V_{10}$  ίσης με  $4m/s$ ,  $6m/s$ ,  $8m/s$  και  $10m/s$  μετρούμενες στα  $10m$  ύψος. Στον Πίνακα 12 δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα των βέλων κάμψης που αποκτά το συγκεκριμένο εύκαμπτο πλαίσιο συγκριτικά με το άκαμπτο για αντίστοιχες κατανομές ταχυτήτων ανέμου.

Ήταν αναμενόμενες οι μεγάλες τιμές του βέλους κάμψης για το πλαίσιο πάχους  $0.01 m$  από υλικό *Plexiglas*. Η τιμή που αντιστοιχεί στην κατανομή με ταχύτητα  $10m/s$  στα  $10 m$  ύψος φτάνει σε μια τιμή βέλους κάμψης ίση με  $1.622 m$ . Στην Εικόνα 47 δίνεται εποπτικά η ελαστική καμπύλη επιφάνεια της περίπτωσης αυτής σε σχέση με το πλαίσιο όταν είναι άκαμπτο.

**Πίνακας 12.** Μέγιστες τιμές βέλους κάμψης για κάθε περίπτωση κατανομής ταχύτητας για το εύκαμπτο και δύσκαμπτο υλικό.

Ταχύτητα αναφοράς ανέμου $V_{10} (m/s)$	Μέγιστο βέλος κάμψης $\Delta l(m)$	
	<i>Plexiglas</i>	Χάλυβας
4	0.388	0.018
6	0.801	0.040
8	1.237	0.071
10	1.622	0.115

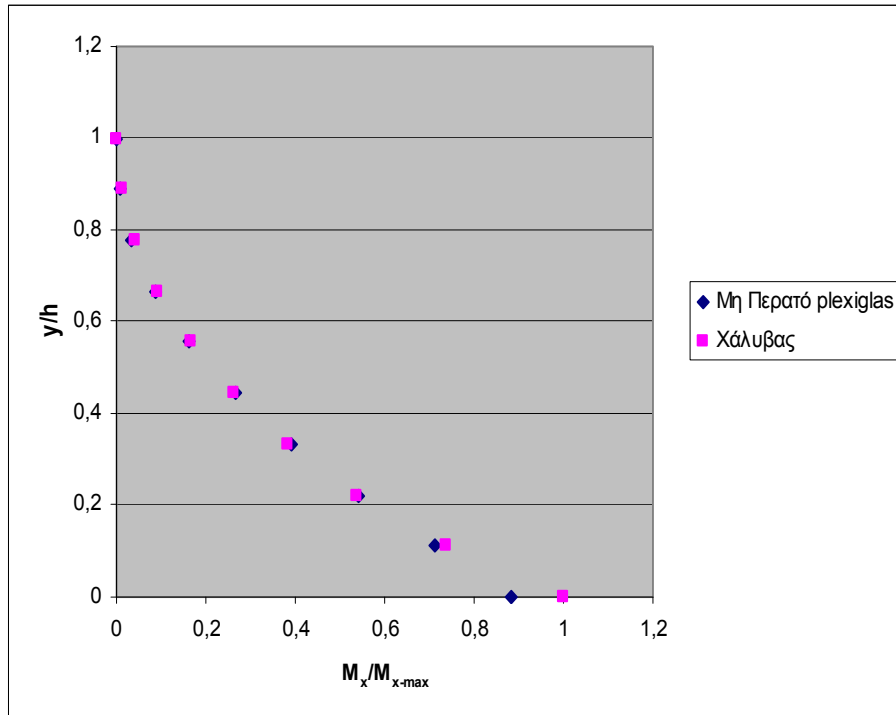


**Εικόνα 47.** Η ελαστική καμπύλη επιφάνεια του παραμορφωμένου πλαισίου από υλικό *Plexiglas* στην περίπτωση ταχύτητας αναφοράς του ανέμου ίση  $10 m/s$ .

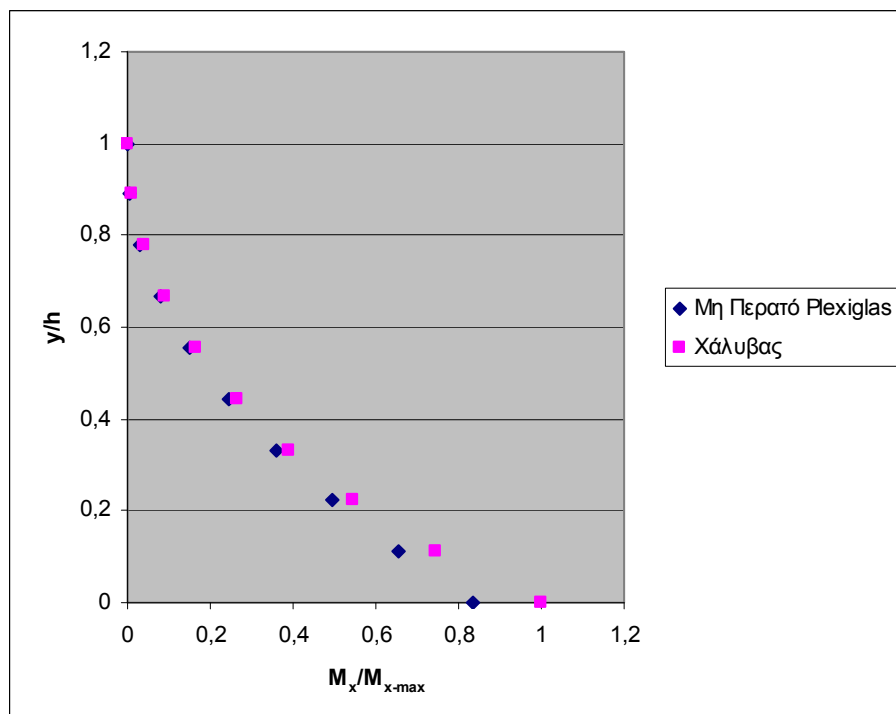
Στην Εικόνα 48 δίνονται οι μεταβολές της ροπής κάμψης καθ' όλο το ύψος του εύκαμπτου πλαισίου από υλικό *Plexiglas* για κάθε μια από τις περιπτώσεις ταχυτήτων αναφοράς του ανέμου που εξετάστηκαν. Σε κάθε διάγραμμα υπάρχει η συγκριτική καμπύλη της μεταβολή της ροπής του δύσκαμπτου πλαισίου από χάλυβα ώστε να γίνουν αντιληπτά τα πλεονεκτήματα της χρήσης του εύκαμπτου πλαισίου. Τα διαγράμματα των ροπών έχουν αδιαστατοποιηθεί με βάση τη μέγιστη τιμή της ροπής όπως αυτή προκύπτει για την περίπτωση του δύσκαμπτου πλαισίου από χάλυβα σε κάθε διαφορετική περίπτωση ταχύτητας αναφοράς του ανέμου. Με αυτό τον τρόπο γίνονται ορατές οι διαφορές που προκύπτουν στις καταπονήσεις από ροπές κάμψης

λόγω διαφορετικής απόκρισης των δυο διαφορετικού υλικού πλαισίων (χάλυβας και Plexiglas). Επίσης το ύψος του πλαισίου, άξονας  $y$ , έχει αδιαστατοποιηθεί με το συνολικό ύψος του υπό εξέταση πλαισίου, δηλαδή  $h=3m$ .

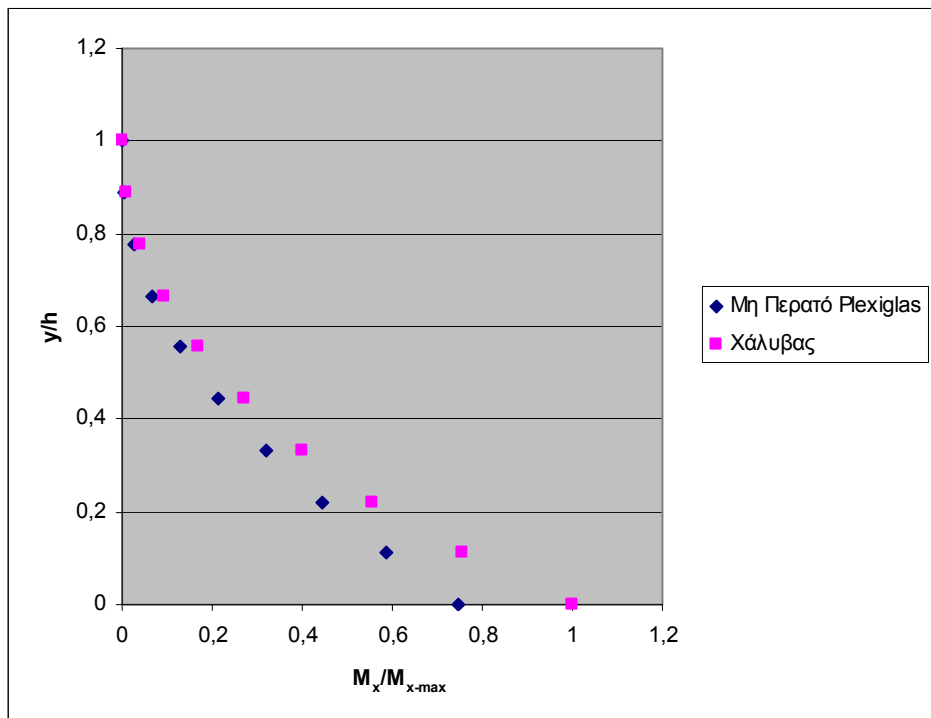
Όπως παρατηρείται στην *Εικόνα 48α* και *48β*, όπου η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου να είναι ίση με  $4m/s$  είτε  $6m/s$ , δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη μεταβολή των ροπών κάμψης σε όλο το ύψος το πλαισίου. Για την μέγιστη τιμή της ροπής όμως, η οποία αναπτύσσεται στη βάση της κατασκευής και στις δυο περιπτώσεις υπάρχουν μειώσεις που δεν μπορούν να θεωρηθούν ασήμαντες στο εύκαμπτο πλαίσιο και είναι ίσες με  $12\%$  και  $18\%$  σε κάθε περίπτωση αντίστοιχα.



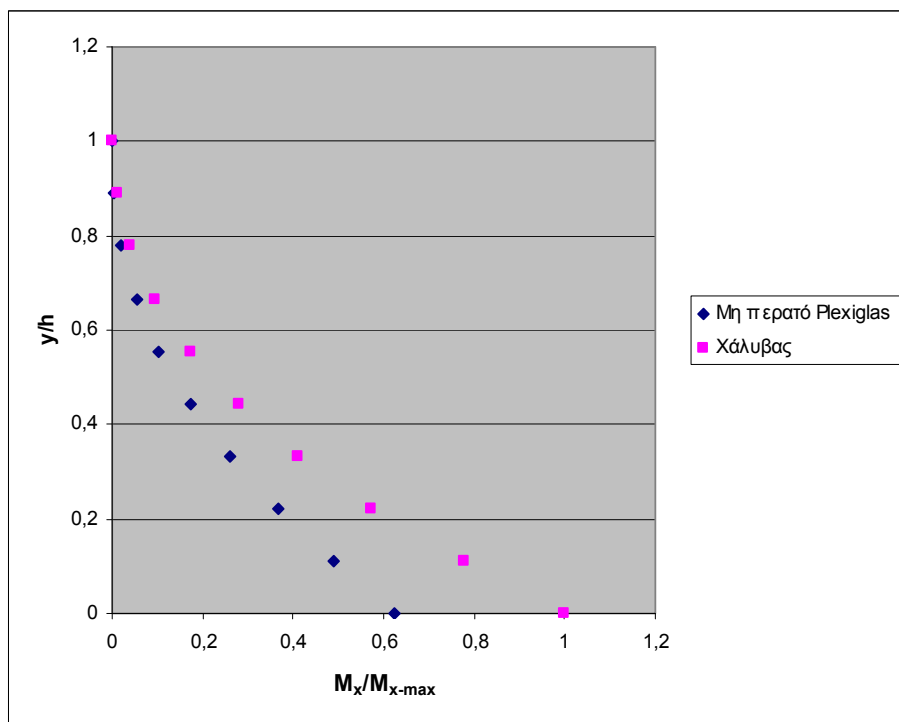
(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Εικόνα 48.** Η μεταβολή της ροπής καθ' όλο το ύψος του εύκαμπτου πλαισίου για κατανομές ταχυτήτων με ταχύτητα αναφοράς στα 10m: α) 4m/s, β) 6 m/s, γ) 8 m/s και δ) 10 m/s. Αντίστοιχες συγκριτικές καμπύλες ροπών για το δύσκαμπτο πλαίσιο από χάλυβα.

Καθώς η τιμή της ταχύτητας αναφοράς αυξάνεται, εντονότερες μεταβολές παρατηρούνται. Για ταχύτητα αναφοράς του ανέμου ίση με 8 m/s (Εικόνα 48γ), σημαντικές διαφορές εμφανίζονται σε ύψος ίσο με το 1/3 της κατασκευής (από τη

βάση της) με τις ροπές στη θέση αυτή να παρουσιάζουν μείωση μεγαλύτερη του 10%. Καθώς οδηγούμαστε στη βάση του πλαισίου οι μεταβολές αυτές αυξάνονται αποκτώντας και πάλι μέγιστη τιμή στη βάση όπου οι ροπές εμφανίζονται μειωμένες κατά σχεδόν 25%.

Στην τελευταία περίπτωση ταχύτητας αναφοράς του ανέμου, ίσης με 10 m/s (Εικόνα 48δ), σημαντικές μεταβολές παρατηρούνται από τα μισά του ύψους του πλαισίου με τις ροπές να είναι μειωμένες κατά 15% ενώ η μέγιστη μείωση να παρουσιάζεται (και πάλι στη βάση) ιδιαίτερα έντονη με τιμή πλησίον του 40%.

Συνολικά, η ανάλυση των ροπών κάμψης (και επίσης των τεμνουσών δυνάμεων) οδηγεί στο συμπέρασμα πως μια εύκαμπτη κατασκευή σαφώς και πλεονεκτεί μια δύσκαμπτη όσο αφορά την καταπόνηση που δέχεται. Όσο η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει και τα φορτία πάνω στο πλαίσιο γίνονται ισχυρότερα τόσο περισσότερο αυξάνονται οι μειώσεις των εντατικών μεγεθών πάνω στο εύκαμπτο πλαίσιο. Αυτό σημαίνει πως ένα τέτοιο πλαίσιο μπορεί να είναι αρκετά ασφαλές. Για τους ίδιους συντελεστές ασφάλειας έναντι οριακών συνθηκών σχεδιασμού ένα εύκαμπτο ελαστικό πλαίσιο από υλικό σχετικά μεγάλης ελαστικότητας αλλά και αντοχής μπορεί να έχει ουσιαστικά μικρότερη απαίτηση υλικού ανά τρέχον μέτρο πλαισίου σε σχέση με μια δύσκαμπτη κατασκευή. Βέβαια το πιθανό οικονομικό όφελος εξαρτάται και από την τιμή του υλικού.

Να σημειωθεί πως πραγματοποιήθηκε έλεγχος και των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο πλαίσιο υπό τη φόρτιση του ανέμου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν πως για ένα εύκαμπτο υλικό που αλληλεπιδρά με τον άνεμο και ισορροπεί για συγκεκριμένη τιμή ανεμοπίεσης αλλά και σε συγκεκριμένη θέση (τελική θέση κατά τη σύγκλιση της μη-γραμμικής ανάλυσης με συγκεκριμένο βέλος κάμψης) οι αξονικές δυνάμεις είναι αμελητέες και δεν μπορούν να επηρεάσουν τον σχεδιασμό της κατασκευής. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε διότι στην περίπτωση όπου εξετάστηκε το πλαίσιο με τη χρήση ελαστικής στήριξης παρουσιάστηκαν αυξημένες αξονικές δυνάμεις πάνω στο συγκεκριμένου σχεδιασμού στήριξης πλαίσιο. Αποσαφηνίζεται λοιπόν πως στην περίπτωση αυτή η ύπαρξη των αυξημένων αξονικών δυνάμεων προήλθε από την ίδια την ελαστική στήριξη κάτι που δεν παρατηρείται σε ένα εύκαμπτο πλαίσιο πακτωμένο σε βάση.

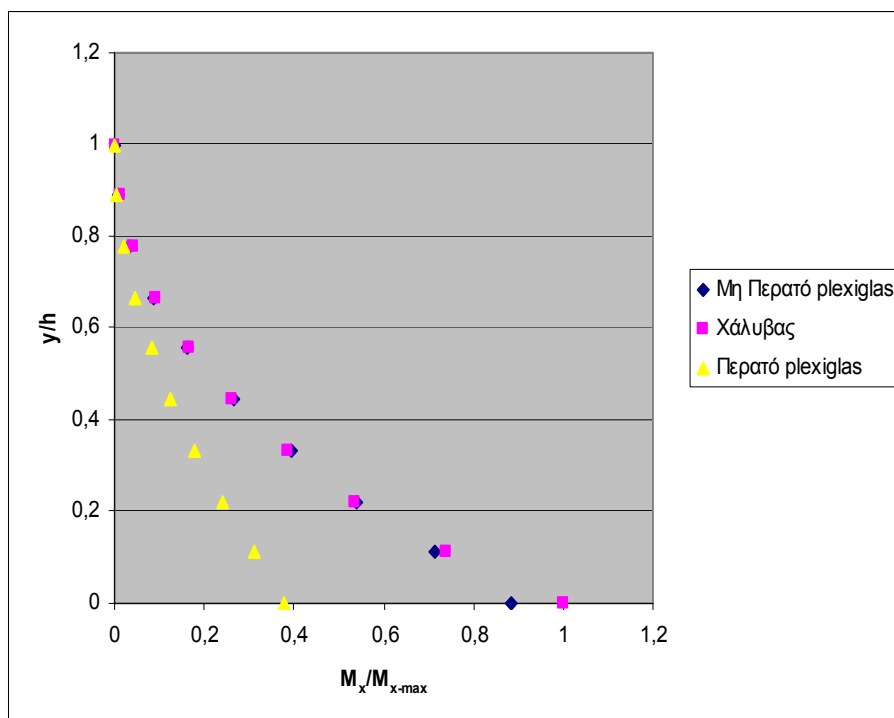
#### **4.6.2. Σύγκριση εύκαμπτου περατού και μη περατού πλαισίου.**

Στο σύνολο της η διατριβή ασχολήθηκε ιδιαίτερα με τα πλεονεκτήματα των περατών υλικών. Κυρίως μελετήθηκαν, ως κάλυψη πλαισίων, γεωργικά δίχτυα μικρής είτε μεγάλης τιμής πορώδους. Στην παρούσα αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός γεωργικού δικτυού για την προσομοίωση ενός περατού εύκαμπτου πλαισίου (Plexiglas) με τη διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως. Στόχος ήταν να υπολογιστούν στην περίπτωση αυτή τα εντατικά μεγέθη όταν το σύστημα άνεμος-εύκαμπτο περατό πλαίσιο ισορροπούν και να συγκριθούν με τα αντίστοιχα του μη περατού αλλά και του δύσκαμπτου πλαισίου. Η μελέτη έγινε για τις αντίστοιχες περιπτώσεις ταχύτητας αναφοράς του ανέμου όπως και ανωτέρω, δηλαδή ίση με 4m/s, 6m/s, 8m/s και 10m/s. Οι συγκρίσεις έγιναν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της Παραγράφου 4.6.1.

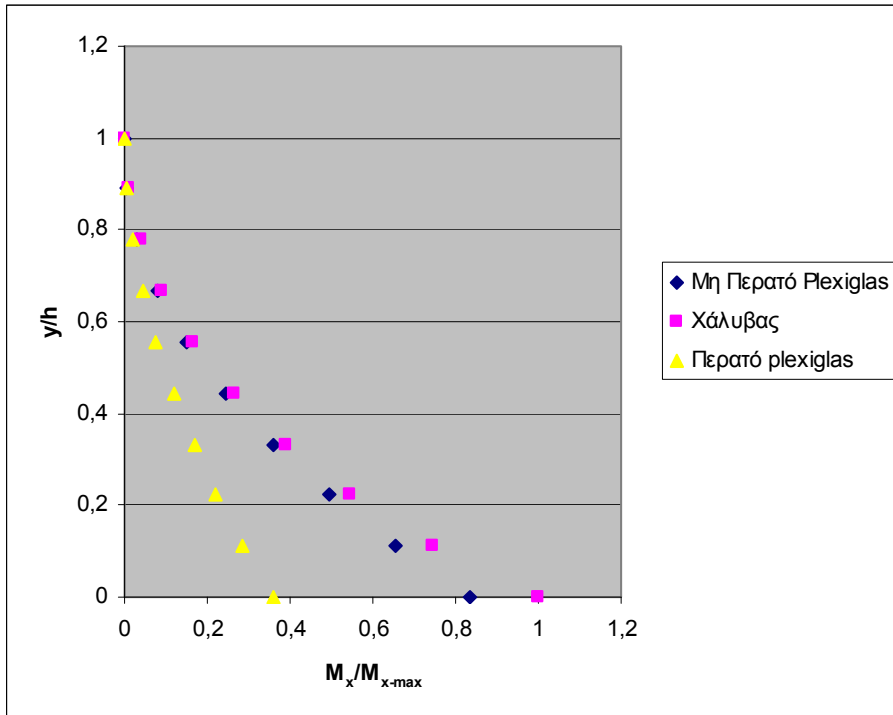
**Πίνακας 14.** Αποτελέσματα βέλους κάμψης διαφορετικής έντασης ταχύτητας αναφοράς ανέμου για το εύκαμπτο περατό και μη αλλά και το δύσκαμπτο υλικό.

Ταχύτητα αναφοράς ανέμου $V_{10}$ (m/s)	Μέγιστο βέλος κάμψης $\Delta l$ (m)		
	Μη περατό Plexiglas	Περατό (46%) Plexiglas	Χάλυβας
4	0.388	0.174	0.018
6	0.801	0.356	0.040
8	1.237	0.627	0.071
10	1.622	0.890	0.115

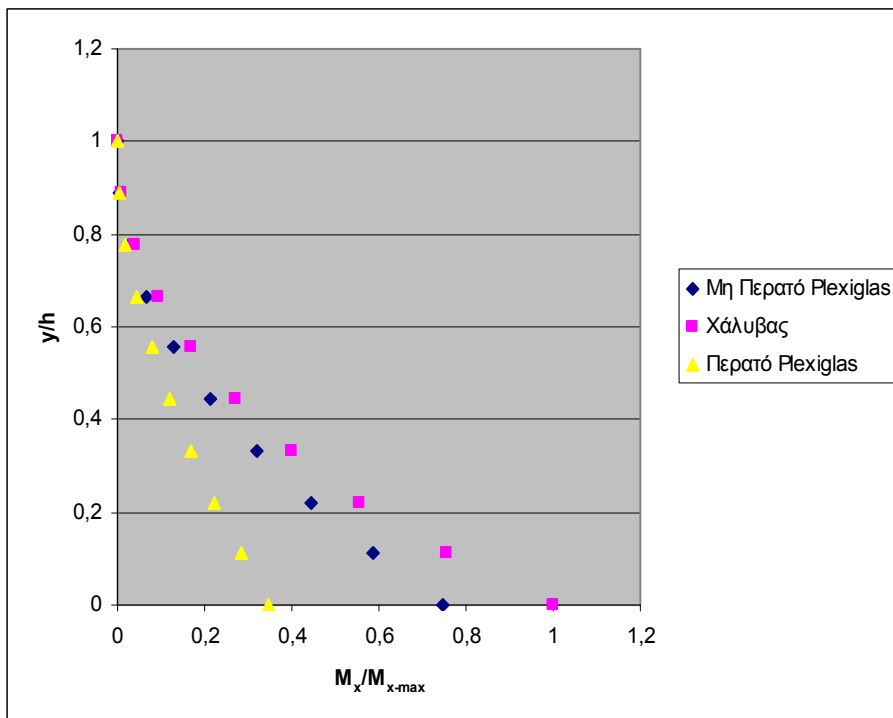
Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται τα βέλη κάμψης του πλαισίου ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό για κάθε διαφορετική ταχύτητα αναφοράς ανέμου στα 10m. Στην Εικόνα 49 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ροπών κάμψης επίσης για κάθε ταχύτητα αναφοράς με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο δόθηκαν (Εικόνα 48), μόνο που πλέον έχει προστεθεί και το αντίστοιχο διάγραμμα για το περατό εύκαμπτο υλικό. Όλες οι τιμές καμπτικής ροπής στο διάγραμμα είναι κανονικοποιημένες με τη μέγιστη τιμή της ροπής του δύσκαμπτου πλαισίου από χάλυβα.



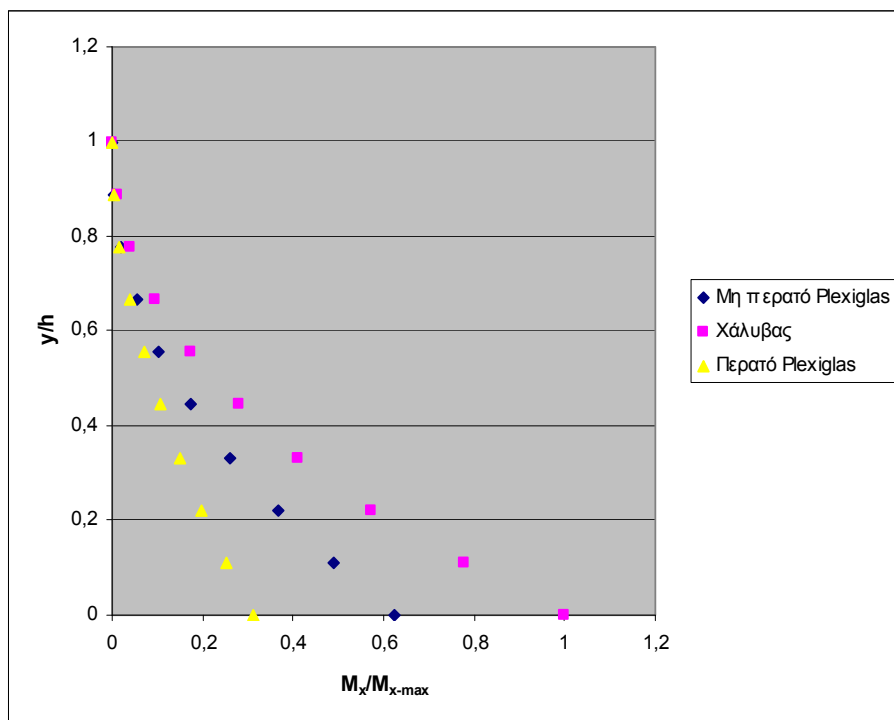
(α)



(β)



(γ)



(δ)

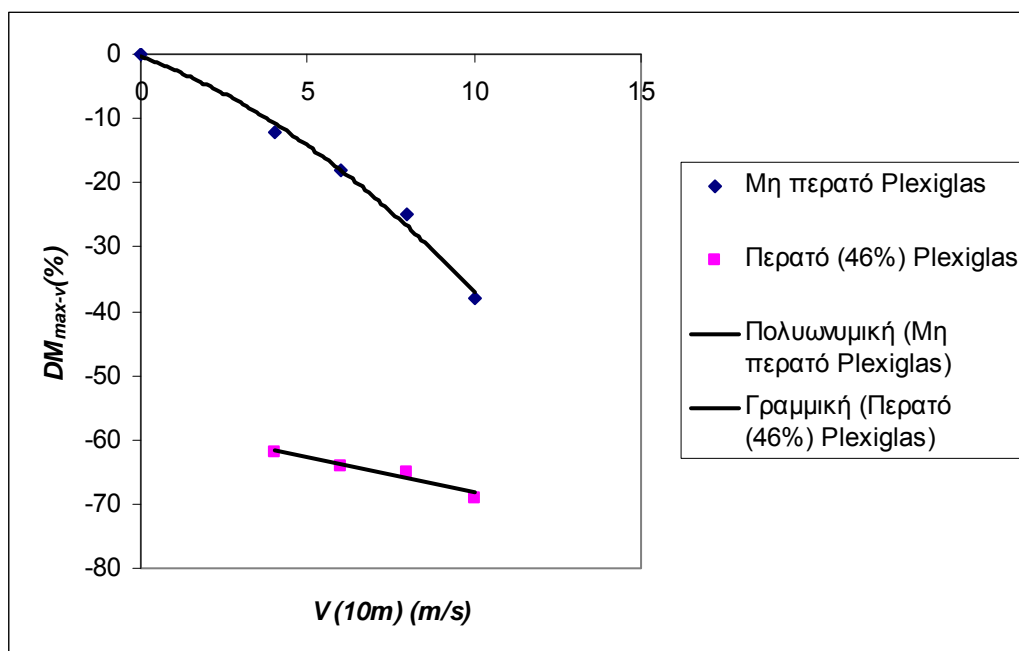
**Εικόνα 49.** Η μεταβολή της ροπής καθ' όλο το ύψος του εύκαμπτου πλαισίου για ταχύτητα αναφοράς στα 10m: α) 4m/s, β) 6 m/s, γ) 8 m/s και δ) 10 m/s. Αντίστοιχες συγκριτικές καμπύλες ροπών για το δύσκαμπτο πλαίσιο από χάλυβα αλλά και για το περατό (46%) Plexiglas.

Σε όλες τις περιπτώσεις τιμών ταχυτήτων αναφοράς εμφανίζονται σημαντικές μειώσεις στις ροπές κάμψης οι οποίες παρατηρούνται πάνω στο εύκαμπτο περατό πλαίσιο παρατηρούνται και σε θέσεις πάνω από το μισό του ύψους του πλαισίου. Συγκεκριμένα κοντά στα 6/10 του ύψους του πλαισίου οι μειώσεις στις ροπές είναι κοντά στο 10% με δραστικές μειώσεις να παρατηρούνται καθώς οδηγούμαστε προς τη βάση του πλαισίου. Στη βάση σε κάθε περίπτωση η μείωση ξεπερνά την πολύ υψηλή τιμή του 60%, ενώ στην περίπτωση με ταχύτητα αναφοράς ίση με 10m/s η μεταβολή της ροπής κάμψης, πάντα σε σχέση με την αντίστοιχη για το δύσκαμπτο πλαίσιο από χάλυβα, είναι ίση με 69%. Αξίζει να σημειωθεί πως οι μεταβολές ανάμεσα στο περατό και μη περατό εύκαμπτο πλαίσιο είναι εξίσου σημαντικές. Για παράδειγμα η μέγιστη μείωση της καμπτικής ροπής στη βάση του εύκαμπτου περατού πλαισίου (με τιμή πορώδους 46%) συγκριτικά με το μη περατό εύκαμπτο πλαίσιο είναι, για όλες τις περιπτώσεις ταχυτήτων αναφοράς, κοντά στο 40%, ενώ και μέχρι το μισό του ύψους του πλαισίου οι διαφορές διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα, άνω του 15%.

Η ανάλυση οδηγεί στο συμπέρασμα πως μια τέτοια περατή κατασκευή αποφέρει σημαντικές μειώσεις στα φορτία ανέμου με αποτέλεσμα ένα περατό εύκαμπτο υλικό να πλεονεκτεί ενός μη περατού. Συνεπώς καθίσταται ακόμη πιο κατάλληλο για τη μείωση των καταπονήσεων που τα φορτία ανέμου προκαλούν. Αυτό οφείλεται στο διπλό κέρδος που προσδίδει η απόκριση του εύκαμπτου ελαστικού περατού πλαισίου στις ανεμοπιέσεις μέσω της ελαστικής κάμψης και του πορώδους του υλικού.

Στην *Εικόνα 50* παρουσιάζεται η μεταβολή των μέγιστων τιμών μείωσης της καμπτικής ροπής, η οποία συγκεκριμένα παρατηρείται στη βάση του πλαισίου όπως έγινε εμφανές από όλα τα παραπάνω διαγράμματα, στις δυο περιπτώσεις του

εύκαμπτου *Plexiglas* αλλά και του εύκαμπτου περατού πλαισίου. Η μεταβολή για το εύκαμπτο πλαίσιο απεικονίζεται με μια καμπύλη δευτέρου βαθμού, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει την ολοένα αυξανόμενη μείωση της μέγιστης ροπής κάμψης καθώς το λογαριθμικό προφίλ αποκτά μεγαλύτερη ένταση (μεγαλύτερες τιμές ταχυτήτων). Στην περίπτωση του περατού εύκαμπτου πλαισίου οι μεταβολές είναι από μικρής ταχύτητας ανέμου αναφοράς αρκετά υψηλές (πάνω από 60%) και στη συνέχεια παρουσιάζεται μια γραμμική αύξηση προς ακόμα πιο μειωμένες τιμές



**Εικόνα 50.** Η μεταβολή των μέγιστων μειώσεων των καμπτικών ροπών συναρτήσει της ταχύτητας αναφοράς για το εύκαμπτο και το εύκαμπτο περατό πλαίσιο (μείωση μέγιστης τιμής της ροπής κάθε περίπτωσης αναφορικά με τη μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής για το δύσκαμπτο πλαίσιο από χάλυβα).

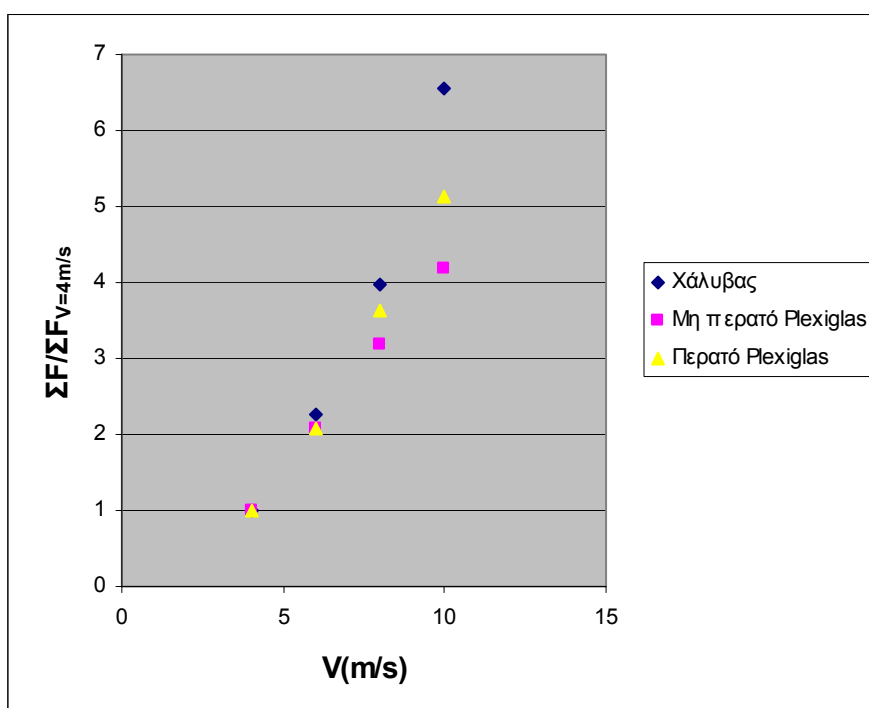
Η συνισταμένη των δυνάμεων που ο άνεμος ασκεί πάνω στο πλαίσιο για κάθε ταχύτητα αναφοράς και για κάθε τύπο πλαισίου προς την συνισταμένη των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο πλαίσιο για ταχύτητα αναφοράς ίση με 4m/s, παρουσιάζεται στην *Εικόνα 51*. Συνεχόμενα, στην *Εικόνα 52* δίνεται ο λόγος της μέγιστης τιμής της καμπτικής ροπής για κάθε διαφορετική ταχύτητα αναφοράς ανέμου προς την μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής για ταχύτητα αναφοράς ανέμου ίση με 4m/s σε συνάρτηση με την τιμή της ταχύτητας αναφοράς του ανέμου και για κάθε διαφορετικό τύπο πλαισίου. Αυτά τα δυο διαγράμματα παρουσιάζονται στη σειρά γιατί αποτελούν ουσιαστικά το αίτιο και το αποτέλεσμα. Οι ανεμοπιέσεις και οι αντίστοιχες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο πλαίσιο εξαιτίας του προσπίπτοντος ανέμου (*Εικόνα 51*), αποτελούν τη δράση στην οποία το πλαίσιο αποκρίνεται με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις και την ανάπτυξη των εντατικών μεγεθών μεταξύ των οποίων και οι μέγιστες τιμές των ροπών στις βάσεις των στηρίξεων (*Εικόνα 52*).

Στην *Εικόνα 51* μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η συνισταμένη των δυνάμεων αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό στην περίπτωση του μη περατού εύκαμπτου πλαισίου (από *Plexiglas*), συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις πλαισίων καθώς η ταχύτητα αναφοράς αυξάνει. Το μη περατό εύκαμπτο πλαίσιο είναι συνεπώς αυτό που αποσβένει περισσότερο τα φορτία ανέμου, καθώς αυτά αυξάνουν, αλλά με μικρότερο ρυθμό, με την αύξηση της ταχύτητας αναφοράς. Άμεσο επακόλουθο, όπως



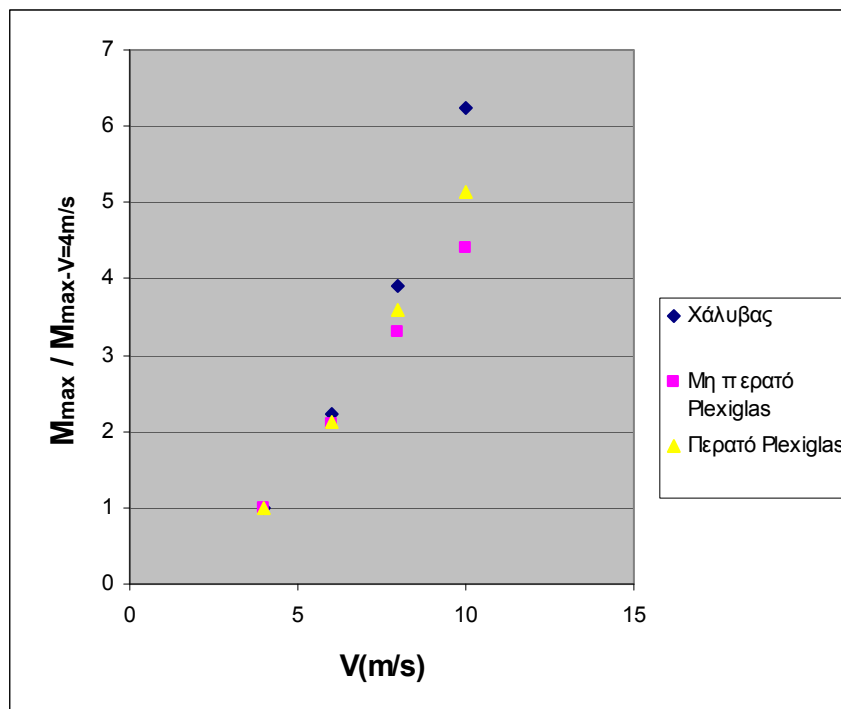
αναμενόταν, είναι η αντίστοιχα μικρότερη αύξηση των μέγιστων τιμών των ροπών στη βάση των στηρίξεων, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου πλαισίου συνυπολογιζόμενης ικανοποιητικής της προστατευτικής ικανότητάς του όπως θα δειχθεί στη συνέχεια.

Για να μη γίνει κάποια παρανόηση, η συνισταμένη δύναμη των ανεμοπιέσεων και οι μέγιστες τιμές των καμπτικών ροπών για συγκεκριμένη ταχύτητα αναφοράς του ανέμου είναι μικρότερες για την περίπτωση του περατού εύκαμπτου υλικού όπως δείχθηκε στο προηγούμενο διάγραμμα. Στην *Εικόνα 51* παρουσιάζεται πως ο ρυθμός απόσβεσης των φορτίων ανέμου, και η επακόλουθη μείωση των εντατικών μεγεθών, αυξάνει στην περίπτωση του μη περατού πλαισίου για αύξηση της ταχύτητας αναφοράς του ανέμου. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς εξαιτίας της μηδενικής τιμής πορώδους που έχει κάμπτεται περισσότερο και έτσι υπάρχει μεγαλύτερη απόσβεση.



**Εικόνα 51.** Λόγος της συνισταμένης δύναμης λόγω των ανεμοπιέσεων πάνω στο πλαίσιο προς τη συνισταμένη δύναμη στο πλαίσιο για ταχύτητα αναφοράς ίση με  $4\text{m/s}$  και για κάθε διαφορετικό τύπο πλαισίου συναρτήσει της ταχύτητας αναφοράς.

Είναι γεγονός πως η χρήση ενός εύκαμπτου υλικού για την κατασκευή ενός πλαισίου μπορεί να αποσβέσει με μεγάλη επιτυχία τα φορτία ανέμου και να αποφέρει σημαντικές μειώσεις στα εντατικά μεγέθη. Το περατό εύκαμπτο πλαίσιο που εξετάστηκε παρουσίασε ακόμη εντονότερα πλεονεκτήματα όσο αφορά τη μείωση των φορτίων πάνω στο ίδιο το πλαίσιο ενώ το μη περατό εύκαμπτο πλαίσιο παρουσιάζει μικρότερο ρυθμό αύξησης των καμπτικών ροπών καθώς αυξάνει η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου. Παρόλα αυτά δεν μπορεί κανείς να κρίνει αποδοτικό ένα πλαίσιο χωρίς να εξετασθεί η προστατευτική ικανότητά του και ένα περατό πλαίσιο, παρά το προαναφερθέν πλεονέκτημα, καθίσταται σε διάφορες περιπτώσεις λιγότερο αξιόπιστη προστατευτική λύση λόγω της τιμής πορώδους που το ίδιο έχει. Στην επόμενη παράγραφο αναλύεται πως τα πλεονεκτήματα των δύο αυτών τύπων πλαισίων μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα.

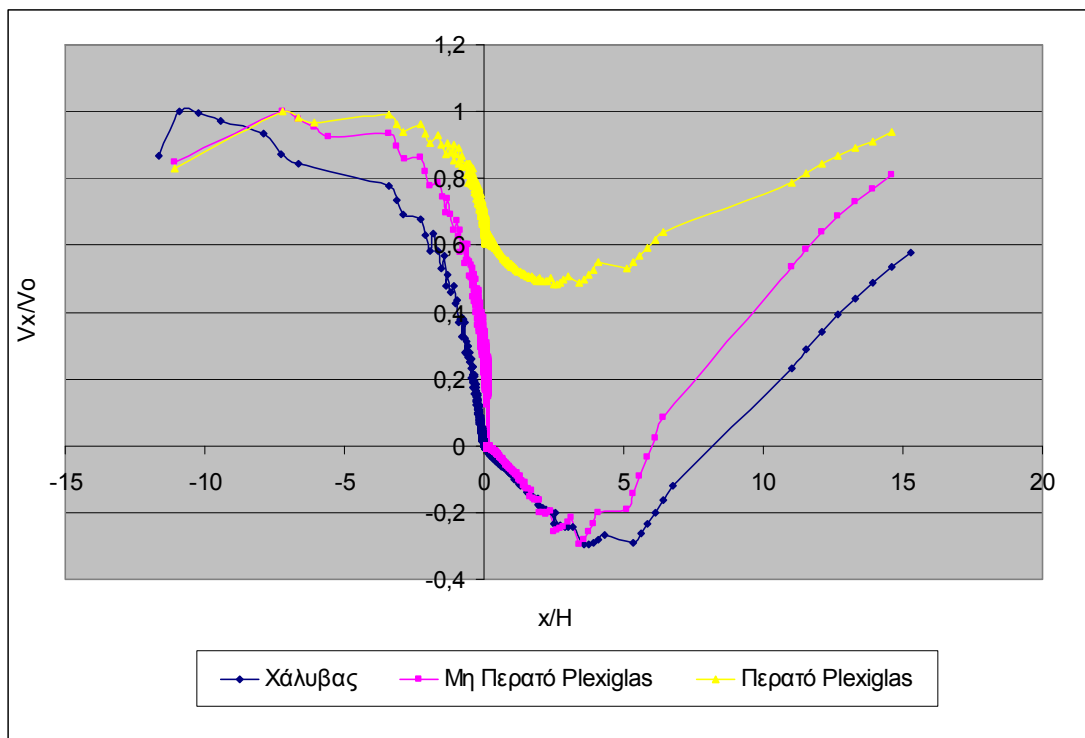


**Εικόνα 52.** Λόγος της μέγιστης τιμής της καμπτικής ροπής για κάθε περίπτωση ταχύτητας αναφοράς του ανέμου και για κάθε τύπο πλαισίου προς τη μέγιστη τιμή καμπτικής ροπής για ταχύτητα αναφοράς με τιμή  $4\text{m/s}$  στα  $10\text{m}$  συναρτήσει της ταχύτητας αναφοράς του ανέμου.

#### 4.6.3. Προστατευτική ικανότητα (*shelter effect*) των τύπων πλαισίων που μελετήθηκαν.

Πέρα από τα αποτελέσματα των ροπών τα οποία αναλύθηκαν διεξοδικά στις προηγούμενες παραγράφους, πρέπει να εξετασθεί και η προστατευτική ικανότητα του κάθε πλαισίου. Μπορεί οι μειώσεις των εντατικών μεγεθών να είναι σημαντικές στο εύκαμπτο πλαίσιο (από *Plexiglas*, σαν παράδειγμα θεωρητικό και όχι εφαρμογής, στην συγκεκριμένη περίπτωση) και ακόμη σημαντικότερες στο περατό εύκαμπτο πλαίσιο αλλά η προστασία της υπήνεμης περιοχής τους είναι ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Στην *Εικόνα 53* παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μεταβολής της ταχύτητας σε σχέση με την αρχική που ορίζεται από τη λογαριθμική κατανομή, στα μισά του ύψους του πλαισίου, δηλαδή  $1.5\text{m}$ , και καθ' όλο το μήκος της ανεμοσήραγγας. Τα διαγράμματα προήλθαν από την αριθμητική προσομοίωση του ρευστοδυναμικού προβλήματος στο τελευταίο βήμα της διαδικασίας, δηλαδή στη σύγκλιση ανεμοπιέσεων και απόκρισης του ελαστικού εύκαμπτου πλαισίου. Οι περιπτώσεις εύκαμπτου πλαισίου που παρουσιάζονται αντιστοιχούν σε ταχύτητα αναφοράς του ανέμου ίση με  $8\text{m/s}$ . Το μήκος επίσης έχει αδιαστατοποιηθεί με το ύψος  $h$  του πλαισίου ( $h=3\text{m}$ ).



**Εικόνα 53.** Η προστατευτική ικανότητα κάθε πλαισίου που μελετήθηκε.

Στο τμήμα της προσήνεμης περιοχής πριν από το πλαίσιο, το οποίο στο διάγραμμα είναι στη θέση  $x=0$ , μικρές διαφορές ανάμεσα στα τρία διαγράμματα της ταχύτητας του ανέμου οφείλονται στα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση πλαισίου. Οι μικρότερες μεταβολές παρουσιάζονται στην περίπτωση του πορώδους πλαισίου. Αυτό είναι λογικό από τη στιγμή που ο αέρας βρίσκει μικρή αντίσταση και μπορεί να διέλθει το πλαίσιο εξαιτίας της τιμής πορώδους που έχει. Αντίθετα μεγαλύτερες μειώσεις παρατηρούνται στην περίπτωση του δύσκαμπτου πλαισίου το οποίο αποτελεί μεγαλύτερο εμπόδιο για την ροή, την ανακόπτει περισσότερο και ως αποτέλεσμα προκύπτουν οι πιο έντονες μειώσεις. Η περίπτωση του μη πορώδους εύκαμπτου πλαισίου βρίσκεται κάπου στη μέση, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 52*.

Η περιοχή που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι η υπήνεμη περιοχή. Είναι εμφανές πως οι μεγαλύτερες μειώσεις παρατηρούνται για την περίπτωση του πλαισίου από χάλυβα, ενώ μικρές είναι οι μειώσεις που προκαλούνται με τη χρήση του πλαισίου από περατό υλικό. Στην περίπτωση του μη περατού εύκαμπτου πλαισίου, παρατηρείται πως για απόσταση μέχρι και  $3.5h$ , περίπου  $10\text{ m}$  υπήνεμα, η προστασία του πλαισίου από εύκαμπτο υλικό (*Plexiglas*) είναι ακριβώς ίδια με του πλαισίου από χάλυβα. Για αποστάσεις μέχρι  $6-7h$ , δηλαδή απόσταση  $20\text{ m}$ , η διαφορά των μεταβολών δεν ξεπερνά το  $20\%$ . Για μεγαλύτερες αποστάσεις οι διαφορές γίνονται υψηλότερες μέχρι την τιμή του  $30\%$ . Όσο αφορά το πορώδες εύκαμπτο πλαίσιο οι συγκρίσεις είναι περιττές από τη στιγμή που οι διαφορές είναι εμφανώς πολύ υψηλές (φθάνει και το  $75\%$ ). Παρόλα αυτά είναι σημαντικό το γεγονός πως δεν υπάρχουν τυρβώδη φαινόμενα στην υπήνεμη περιοχή του περατού πλαισίου (έλλειψη αρνητικών ταχυτήτων – στροβίλων) και επηρεάζει σε κάποιες περιπτώσεις πολύ έντονα την προστασία της υπήνεμης περιοχής του πλαισίου, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Μια πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν στις αριθμητικές προσομοιώσεις των πλαισίων στις θέσεις ισορροπίας (steady state analysis). Η πραγματική προστασία που ένα εύκαμπτο πλαίσιο μπορεί να παρέχει

μπορεί να μελετηθεί πληρέστερα με πλήρους κλίμακας πείραμα ώστε να φανεί πως συνολικά το δυναμικό φαινόμενο επηρεάζει τον παράγοντα αυτό. Στην *Παράγραφο 3.5.1* δείχθηκε, με τη βοήθεια του πλήρους κλίμακας πειράματος, πως η κίνηση του ελαστικά στηριζόμενου πλαισίου αποσβένει την κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος ανέμου με αποτέλεσμα οι ταχύτητες ανέμου στην υπήνεμη περιοχή να μειώνονται περισσότερο από ότι στην περίπτωση ενός ακίνητου κατακόρυφου πλαισίου. Άρα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως η μείωση των ταχυτήτων υπήνεμα με χρήση του εύκαμπτου μη περατού πλαισίου θα είναι πιθανότατα υψηλότερη από αυτή της *Εικόνας 52*.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα που η αριθμητική προσομοίωση δίνει είναι γεγονός πως η προστατευτική ικανότητα ενός πλαισίου είναι ένας παράγοντας σχετικός και μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς άλλους, αντίθετα με την μείωση των φορτίων που είναι δεδομένες και επιθυμητές. Αν λοιπόν η υπήνεμη περιοχή, που απαιτείται η προστασία της, είναι μικρή τότε και τα υπάρχοντα αποτελέσματα μας διαβεβαιώνουν για την αναμενόμενη καλή λειτουργία και αποδοτικότητα του εύκαμπτου μη περατού πλαισίου. Για μεγαλύτερες απαιτήσεις σε έκταση προστασίας, ο παράγοντας που τότε επηρεάζει είναι το υπό προστασία προϊόν. Για ένα σχετικά ανθεκτικό προϊόν και πάλι το εύκαμπτο μη περατό πλαίσιο είναι δυνατό να είναι αποδοτικό. Οι διαφορές που παρουσιάζει με το δύσκαμπτο πλαίσιο είναι εμφανείς αλλά αγγίζουν μια μέγιστη διαφορά πλησίον του 30%, η οποία μάλιστα παρατηρείται για αποστάσεις μεγαλύτερες από  $x/h=10$ , γεγονός που πιθανότατα δεν δημιουργεί πρακτικά προβλήματα προστασίας.

Το περατό πλαίσιο (από *Plexiglas* στο θεωρητικό παράδειγμα που αναλύθηκε) παρουσίασε τις μεγαλύτερες μειώσεις κατά τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών αλλά και τις μικρότερες στις τιμές των υπήνεμων ταχυτήτων, λόγω του συνδυασμού της ευκαμψίας και της ιδιότητας της περατότητας. Εξαιτίας της τελευταίας εξαφανίζονται τα τυρβώδη φαινόμενα και οι αναρροφήσεις (suctions) που οι στρόβιλοι προκαλούν στην υπήνεμη περιοχή του. Αυτό από μόνο του καθιστά προστατευτικό το συγκεκριμένο πλαίσιο στην υπήνεμη περιοχή που βρίσκεται κοντά στο πλαίσιο ειδικά για ευαίσθητα στη βίαιη στροβιλώδη ροή φυτά. Στην *Παράγραφο 1.4.2* παρουσιάστηκε πως ένα πλαίσιο το οποίο προστατεύει μια πολύ ευαίσθητη καλλιέργεια ή την μεταφορά ενός υλικού (άμμος, στάχτη, σκόνη) απαιτείται να είναι ικανό να αποσβέσει τα τυρβώδη φαινόμενα. Οι ριπές ανέμου και οι στρόβιλοι που προκαλούν έντονες αναρροφήσεις στο έδαφος (εκτός της υπήνεμης επιφάνειας του πλαισίου) είναι τα φαινόμενα που πρέπει να αντιμετωπιστούν και αυτό μπορεί να γίνει με ένα περατό πλαίσιο, τιμής πορώδους άνω του 30%. Το υπό μελέτη εύκαμπτο περατό πλαίσιο μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις αυτές, προκαλώντας την απόσβεση των τυρβωδών φαινομένων, αλλά ταυτόχρονα πλεονεκτεί λόγω της σημαντικής μείωσης των φορτίων ανέμου στην επιφάνειά του και των αναπτυσσόμενων εσωτερικών δυνάμεων και τάσεων. Αυτό το καθιστά ακόμη πιο αποδοτικό από τα συνηθισμένα περατά κατακόρυφα πλαίσια για μιας τέτοιας φύσεως χρήση.

Όσον αφορά το πεδίο προστασίας της υπήνεμης ζώνης σχεδιάζεται να μελετηθεί σε επόμενο ερευνητικό έργο η συμπεριφορά και αξιοποίηση επάλληλων πλαισίων και να συγκριθεί η επίδραση των παραγόντων της περατότητας και ευκαμψίας του συστήματος πλέον των πλαισίων αυτών στα χαρακτηριστικά της προστατευόμενης ζώνης.

## 5. Συμπεράσματα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή συνδυάζει τη γεωργική μηχανική (agricultural engineering) με τη μηχανική του ανέμου (wind engineering), από τη στιγμή που επικεντρώνεται στην μελέτη μιας από τις βασικότερες και παλαιότερες γεωργικές κατασκευές, τα κατακόρυφα πλαίσια, και το πώς αλληλεπιδρούν με τον προσπίπτοντα άνεμο. Για τη μελέτη και τον σχεδιασμό χαμηλών, ελαφρών κατασκευών, όπως τα πλαίσια, οι δυο αυτοί κλάδοι είναι αλληλένδετοι, διότι ο άνεμος είναι ο πιο σοβαρός παράγοντας για πιθανές καταστροφές σε τέτοιου τύπου κατασκευές. Στη διεθνή βιβλιογραφία τα κατακόρυφα πλαίσια μπορούν να συναντηθούν και ως τοίχοι (walls) είτε ανεμοφράκτες (windbreaks).

### 5.1. Συμπεράσματα από τον έλεγχο της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια κριτική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για τα φορτία ανέμου σε κατακόρυφα πλαίσια κάθε τύπου, δηλαδή υπερυψωμένα και μη αλλά και πλαίσια κάποιας τιμής πορώδους είτε αδιαπέραστα. Συγκρίσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνητικών μελετών οδήγησαν σε σημαντικά συμπεράσματα. Οι συγκρίσεις αυτές βασίστηκαν στους προτεινόμενους, με βάσει πειραματικές μετρήσεις ή αριθμητικές προσομοιώσεις, από τις μελέτες συντελεστές δύναμης  $c_f$ .

Τα αδιαπέραστα πλαίσια στο έδαφος είναι ένα θέμα πολύ καλά μελετημένο και τα αποτελέσματα από πολλές μελέτες στη βιβλιογραφία συμφωνούν μεταξύ τους οδηγώντας στο συμπέρασμα πως περαιτέρω διερεύνηση επί του θέματος πιθανώς να αφορά κάποια πολύ εξειδικευμένα θέματα που παραμένουν ανοιχτά προς περαιτέρω διερεύνηση.

Παρά τον σχετικά σημαντικό αριθμό ερευνητικών μελετών που έχουν δημοσιευθεί, οι τιμές που δίνονται για τα φορτία ανέμου σε περατά πλαίσια παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις και για αρκετές περιπτώσεις χαρακτηριστικών πλαισίων και υλικών είναι υπό αμφισβήτηση. Είναι γεγονός ότι έχουν γίνει επανειλημμένες προσπάθειες ώστε να συσχετισθεί η μείωση των φορτίων ανέμου με την αύξηση του πορώδους  $p$  ενός περατού πλαισίου. Μέχρι σήμερα δεν έχει προταθεί μια συγκεκριμένη και πειραματικά επιβεβαιωμένη σχέση που να καλύπτει όλους τους τύπους των περατών υλικών. Το πορώδες δεν φαίνεται από μόνο του να είναι ικανή παράμετρος που να χαρακτηρίζει πλήρως και αποκλειστικά την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός περατού υλικού. Αυτό αποδεικνύει και η ασυμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων προηγούμενων ερευνητικών μελετών. Η μικροσκοπική γεωμετρική μορφή (geometric form) είναι ένας παράγοντας που πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Σε κάποιες μελέτες η μείωση των φορτίων ανέμου σχετίστηκε με παραμέτρους που εμπειρεύσαν εκτός του πορώδους και την επίδραση της γεωμετρικής μορφής των κενών του περατού υλικού στην αεροδυναμική συμπεριφορά του. Η ανάγκη πραγματοποίησης πειράματος ανεμοσήραγγας για τη μέτρηση των παραμέτρων αυτών ήταν το βασικό μειονέκτημά τους, οδηγώντας πολλούς ερευνητές να εστιάσουν σε μια μόνο παράμετρο, το πορώδες  $p$ .

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει μικρός αριθμός μελετών για πλαίσια με τιμές πορώδους μεγαλύτερες του 50%. Πειραματικά αποτελέσματα σε υλικά με χαμηλές τιμές πορώδους ( $p \leq 30\%$ ) παρουσιάζουν μια σχετική συμφωνία, όχι όμως και τα αριθμητικά αποτελέσματα, κάνοντας ξεκάθαρο το γεγονός πως η προσομοίωση ενός περατού υλικού πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Παρά τη γενική αυτή

συμφωνία, πρόσφατα αποτελέσματα πλήρους κλίμακας πειράματος στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών [23] έδειξαν αρκετά διαφορετικές τιμές συντελεστών δύναμης για πλαίσια καλυμμένα με υλικά που είχαν ακριβώς ίδια τιμή πορώδους αλλά διαφορετική μορφολογία πλέξης. Αυτό δείχνει ότι η προσπάθεια συσχέτισης της μεταβολής των φορτίων ανέμου σε ένα περατό πλαίσιο αποκλειστικά και μόνο με το πορώδες δεν είναι επαρκής και πως τα αεροδυναμικά φαινόμενα που προκύπτουν δεν είναι τόσο απλά. Αυτός ήταν και ένας λόγος που σε όλα τα τμήματα της έρευνας της παρούσας διατριβής μελετήθηκαν συγκριτικά περιπτώσεις τόσο μη-περατών όσο και περατών πλαισίων. Ο δεύτερος λόγος ήταν φυσικά οι σημαντικές εφαρμογές των περατών πλαισίων στη γεωργία (τα οποία σήμερα σχεδιάζονται ημι-εμπειρικά).

Ελάχιστες εργασίες υπάρχουν δημοσιευμένες σχετικά με φορτία ανέμου σε υπερυψωμένα πλαίσια. Μια σημαντική αναφορά αποτελεί η εκτεταμένη δουλειά του Letchford [18] αλλά επιπρόσθετη ερευνητική μελέτη χρειάζεται ώστε να θεωρηθούν πλήρως αξιόπιστα τα αποτελέσματά του και πιθανότατα να εξηγηθούν ασυμφωνίες με κάποιες παρεμφερείς μελέτες, αλλά και για να καλυφθούν περιπτώσεις χαρακτηριστικών που δεν καλύπτονται από τις δημοσιευμένες εργασίες.

Επίσης πραγματοποιήθηκε μια γρήγορη ανασκόπηση για τη μορφή του πεδίου ροής γύρω από ένα πλαίσιο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του και το πορώδες του. Παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά της υπήνεμης ροής η οποία είναι σημαντική από τη στιγμή που ένα κατακόρυφο πλαίσιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τμήμα ανεμοφράκτη. Προσδιορίστηκε για ποιες τιμές αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του περατού υλικού απουσιάζει ο υπήνεμος στρόβιλος και τα έντονα τυρβώδη φαινόμενα και πως, κατά την εμφάνισή του, μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του με τη γεωμετρία του πλαισίου. Η επιλογή των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του περατού υλικού του πλαισίου είναι ένα θέμα που βασίζεται σε πολλούς παράγοντες και εξαρτάται κυρίως από την συγκεκριμένη εφαρμογή που το πλαίσιο χρησιμοποιείται και το κόστος που μπορεί να καλυφθεί.

Παρουσιάστηκαν επίσης προτεινόμενες τιμές σχεδιασμού από τους δυο πιο γνωστούς κατασκευαστικούς κώδικες, τον Ευρωπαϊκό [21] και τον Αμερικάνικο κώδικα [22]. Ασυνέπειες και ασυμφωνίες για τον καθένα ξεχωριστά εντοπίστηκαν κυρίως στην περίπτωση των προτεινόμενων συντελεστών δύναμης για περατά πλαίσια ενώ έγινε αντιληπτό ότι συγκρίσεις ανάμεσά τους βασισμένες στους προτεινόμενους συντελεστές δύναμης πιθανότατα οδηγούν σε μη ρεαλιστικά συμπεράσματα λόγω σημαντικών διαφορών που εμφανίζουν. Συγκρίσεις των κωδίκων είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν μόνο μέσω των δυνάμεων σχεδιασμού οι οποίες προκύπτουν με τη βοήθεια των συντελεστών δύναμης αλλά άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με μια διαφορετική διαδικασία υπολογισμών που ο κάθε κώδικας προτείνει.

## 5.2 Έρευνα

Το ερευνητικό τμήμα της διατριβής χωρίζεται σε δυο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα στόχος ήταν η μελέτη και κατανόηση της ροής γύρω από ένα σταθερό πλαίσιο μέσα από πειραματικές διαδικασίες. Έπρεπε να γίνουν ξεκάθαρα τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου και το πώς τα χαρακτηριστικά αυτά αλλά και τα φορτία ανέμου μεταβάλλονται με τα γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του πλαισίου. Ερευνώντας τη διεθνή βιβλιογραφία επιλέχθηκε το πλαίσιο αυτό να είναι υπερυψωμένο και να είναι δυνατό να αλλάζουν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του, με βασικό παράγοντα το πορώδες του, διότι μια τέτοια κατασκευή έχει μελετηθεί ελάχιστα. Ιδιαίτερα η μελέτη υπερυψωμένου πλαισίου με

υψηλή τιμή πορώδους που πραγματοποιήθηκε δεν αναφέρεται σε καμιά προηγούμενη ερευνητική μελέτη. Συγκεκριμένα η συμπεριφορά περατών υλικών και ιδιαίτερα γεωργικών δικτύων αποτέλεσε βασικό αντικείμενο έρευνας της διατριβής. Η ροή του ανέμου γύρω από πλαίσια με περατή κάλυψη και συγκεκριμένα η μελέτη των μεταβολών στη ροή που τα γεωργικά δίκτυα προκαλούν αποτέλεσε σημαντικό ερευνητικό στόχο σε κάθε ερευνητικό στάδιο της διατριβής.

Στο δεύτερο τμήμα της διατριβής η ερευνητική μελέτη επικεντρώνεται σε πλαίσια τα οποία είναι ικανά να στραφούν γύρω από σταθερό άξονα είτε να καμφθούν καθώς αλληλεπιδρούν με τον άνεμο. Έτσι πραγματοποιήθηκε η μελέτη της απόκρισης στα φορτία ανέμου μιας κατασκευής πλαισίου στο έδαφος με ελαστική στήριξη αλλά και ενός πλαισίου το οποίο έχει κατασκευαστεί με βάση ένα εύκαμπτο υλικό. Η αρχική και βασική ιδέα της διατριβής ήταν η μελέτη και δημιουργία ενός εύκαμπτου πλαισίου το οποίο θα αξιοποιεί όλα τα πλεονεκτήματα που έχει ένας φυσικός ανεμοφράκτης (από δέντρα) καθώς αλληλεπιδρά με τον άνεμο, δηλαδή θα μπορεί με την κάμψη του να αποσβένει τα φορτία ανέμου, γεγονός που θα του μειώνει το κόστος κατασκευής και θα του αυξάνει το χρόνο ζωής. Η χρήση εύκαμπτων περατών ή μη πετασμάτων σε γεωργικές κατασκευές είναι ένα θέμα το οποίο δεν έχει μελετηθεί καθόλου.

Τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα πειράματα πλήρους κλίμακας και η αριθμητική προσομοίωση. Τα πλήρους κλίμακας πειράματα έλαβαν χώρα στον πειραματικό αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Πλήρους κλίμακας πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα ερευνητικά στάδια της διατριβής πλην της περίπτωσης του εύκαμπτου πλαισίου όπου πραγματοποιήθηκε μόνο αριθμητική προσομοίωση. Ο λόγος ήταν η δυσκολία και το κόστος κατασκευής μιας τέτοιας διάταξης αλλά και τα πολύ καλά αριθμητικά αποτελέσματα στην περίπτωση του ελαστικά στηριζόμενου πλαισίου που απέδειξαν την πολύ καλή προσομοίωση του δυναμικού φαινομένου της αλληλεπίδρασης του ανέμου με ένα πλαίσιο ικανό να αποκριθεί-μετατοπισθεί μέσω στροφής.

Η αριθμητική προσομοίωση ως μέθοδος επίλυσης ρευστοδυναμικών προβλημάτων αναπτύχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες. Αποτελεί όμως μια φθηνή και γρήγορη εναλλακτική λύση για αυτό και τα τελευταία χρόνια υπάρχει σημαντική πρόοδος στον τομέα αυτό. Ακόμη όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως αξιόπιστη και επιβεβαιώνεται μόνο από σύγκριση με αντίστοιχο πείραμα πλήρους κλίμακας. Ένας ακόμη βασικός στόχος της διατριβής ήταν να ελεγχθεί η αξιοπιστία των αριθμητικών μοντέλων σε προβλήματα σαν αυτά που τέθηκαν υπό εξέταση στην παρούσα διατριβή.

### ***5.2.1 Συμπεράσματα της μελέτης της αλληλεπίδρασης του ανέμου με σταθερό υπερυψωμένο πλαίσιο με διαφορετική τιμή πορώδους.***

Μετά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση η διατριβή οδηγήθηκε στα ερευνητικά θέματα. Έτσι παρήχθησαν νέα δεδομένα και ανάλυση που αφορά το πεδίο ροής του ανέμου καθώς αυτός προσπίπτει σε ένα υπερυψωμένο πλαίσιο το οποίο καλύπτεται από περατό είτε μη περατό υλικό. Κατασκευές στις οποίες χρησιμοποιούνται περατά υλικά δεν είναι εύκολο να μελετηθούν σε ανεμοσήραγγες, διότι θα πρέπει τα χαρακτηριστικά όπως το πορώδους υλικού αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους να μοντελοποιηθούν υπό την ίδια κλίμακα ώστε να είναι ρεαλιστική η απεικόνιση της μελέτης αυτής. Για το λόγο αυτό, η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι μια φθηνή εναλλακτική λύση. Παρόλα αυτά, όπως προαναφέρθηκε, τα υπολογιστικά αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα μόνο υπό την

επιβεβαίωση πλήρους κλίμακας πειραματικών μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία αξιολογούνται λεπτομερώς με τη βοήθεια πειραμάτων πλήρους κλίμακας. Στα πειράματα πλήρους κλίμακας μετρούμενα δεδομένα της ταχύτητας ανέμου αποδίδουν τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου. Δυνατότητες και προβλήματα της υπολογιστικής ανάλυσης γίνονται εμφανή και σχολιάζονται.

Πιο συγκεκριμένα, στο στάδιο αυτό της έρευνας, πραγματοποιήθηκε πείραμα πλήρους κλίμακας με στόχο τη μέτρηση ταχυτήτων ανέμου και την ανάλυση του πεδίου ροής γύρω από το υπερυψωμένο πλαίσιο το οποίο καλύπτεται από περατό είτε μη περατό υλικό. Έντονα τυρβώδη φαινόμενα παρουσιάζονται στην περίπτωση που το πλαίσιο καλύπτεται από αδιαπέραστο πλαστικό εξαιτίας των οποίων προέκυψαν διαφορές στις συγκρίσεις των τιμών των ταχυτήτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης στις θέσεις αυτές, όπου η ροή υφίσταται αποκόλληση και οι στρόβιλοι δημιουργούνται. Ήταν ήδη γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι στις θέσεις αυτές η ροή του ανέμου είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσομοιωθεί με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων [41]. Παρά την ασυμφωνία αυτή, η μορφή του πεδίου ροής αναπαράγεται ικανοποιητικά και οι αριθμητικές προσομοιώσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ποιοτική ανάλυση της ροής του ανέμου γύρω από ένα μη περατό πλαίσιο.

Στην περίπτωση των κατασκευών που χρησιμοποιούν ως κάλυψη περατά υλικά (γεωργικά δίχτυα στη περίπτωση της παρούσας μελέτης), οι αριθμητικές προσομοιώσεις μπορούν να αποφέρουν ακόμη πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, από τη στιγμή που στην περίπτωση αυτή δεν υφίσταται αποκόλληση στη ροή του ανέμου και δεν υπάρχει δημιουργία στροβίλων εξαιτίας του πορώδους του υλικού κάλυψης. Τα αποτελέσματα του πλήρους κλίμακας πειράματος και της αριθμητικής προσομοίωσης βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία για την περίπτωση της κάλυψης του υπερυψωμένου πλαισίου με γεωργικά δίχτυα. Η αριθμητική προσομοίωση εμφανίζεται να είναι ένα αρκετά αξιόπιστο εργαλείο για τη μελέτη προβλημάτων που σχετίζονται με τη ροή του ανέμου γύρω από περατά πλαίσια. Στην περίπτωση αυτή, με τη βοήθεια της αριθμητικής προσομοίωσης, οι αεροδυναμικοί συντελεστές προβλέπονται με μεγαλύτερη ακρίβεια όπως και οι τιμές των ταχυτήτων του πεδίου ροής του ανέμου, σε αντίθεση με την ανάλυση για τα μη περατά πλαίσια όπου εμφανίζονται τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Ισο-καμπύλες της κινητικής ενέργειας της τύρβης αποδίδουν την ένταση των τυρβωδών φαινομένων στην περιοχή γύρω από το πλαίσιο και για τις δυο περιπτώσεις διαφορετικής κάλυψης. Όπως ήταν αναμενόμενο, η ροή ήταν πιο ομαλή για την περίπτωση περατών δικτύων ως υλικό κάλυψης του πλαισίου, ενώ υψηλές τιμές της κινητικής ενέργειας της τύρβης συσχετιζόταν άμεσα με τη χρήση μη περατής κάλυψης.

Για την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά μοντέλα τύρβης, το  $k-\epsilon$  και το  $k-\epsilon$  *RNG*. Το δεύτερο φαίνεται να παρέχει καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά τις μέσες τιμές των ανεμοπιέσεων πάνω στο πλαίσιο, οι οποίες συμφωνούν με τις υπάρχουσες πλήρους κλίμακας μετρήσεις. Παρόλα αυτά, κανένα από τα δυο μοντέλα δεν μπορεί να προσομοιώσει με επιτυχία το πεδίο των ταχυτήτων του ανέμου. Ασυμφωνία, βέβαια, φαίνεται να υπάρχει, κατά τη σύγκριση με τις πλήρους κλίμακας μετρήσεις, μόνο στην περίπτωση της μη περατής κάλυψης του πλαισίου. Αυτό καθιστά τις αριθμητικές προσομοιώσεις ένα επαρκές εργαλείο για φθηνή, γρήγορη και αξιόπιστη εκτίμηση της συμπεριφοράς του ανέμου σε κατασκευές παρόμοιες των υπερυψωμένων πλαισίων, όπως τα αντιχαλαζιακά δίχτυα και οι ανεμοφράκτες, και συγκεκριμένα στην περίπτωση όπου



κάθετος άνεμος προσπίπτει σε μια τέτοια κατασκευή που χρησιμοποιείται ένα περατό υλικό ως κάλυψη.

Επίσης η ικανότητα προστασίας του υπερυψωμένου πλαισίου εκτιμήθηκε αριθμητικά για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κάλυψης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρέχουν λεπτομέρειες σχετικά με τις ποσοτικές και ποιοτικές διαφορές των υπό εξέταση περιπτώσεων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του πλαισίου με κάλυψη αδιαπέραστου πλαστικού, η περιοχή προστασίας είναι μεγαλύτερη αλλά η δημιουργία έντονων τυρβωδών φαινομένων στην υπήνεμη περιοχή του πλαισίου δεν είναι επιθυμητή. Τα πλαίσια με κάλυψη διχτυού οδηγούν σε πιο ομαλή ροή υπήνεμα αλλά είναι ικανά να προστατέψουν μικρότερη περιοχή, με την περιοχή προστασίας να μικραίνει με την αύξηση του πορώδους του υλικού κάλυψης. Το πορώδες του πλαισίου πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά με βάση τις συνθήκες προστασίας που θέλει κανείς να δημιουργήσει αλλά και το συνολικό κόστος της κατασκευής για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

### ***5.2.2 Συμπεράσματα της μελέτης της αλληλεπίδρασης του ανέμου με πλαίσιο το οποίο μπορεί να στραφεί γύρω από σταθερό άξονα.***

Από τη στιγμή που είχε μελετηθεί ενδελεχώς η ροή και τα φορτία ανέμου για ένα ακίνητο πλαίσιο περατό και μη, ήταν πιο εύκολο να προχωρήσει κανείς στη μελέτη της αλληλεπίδρασης του ανέμου με ένα πλαίσιο με ελαστική στήριξη του οποίου να επιτρέπεται η στροφή περί σταθερού άξονα στη βάση αλλά και με ένα εύκαμπτο πλαίσιο.

Συγκεκριμένα μελετήθηκε αρχικά ένα πλαίσιο το οποίο στηριζόταν ελαστικά (με τη βοήθεια στηρίξεων με ελατήρια υπολογισμένης ελαστικότητας). Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια πειραμάτων πλήρους κλίμακας αλλά και με τη βοήθεια σύνθετης ανάλυσης που την αποτελούσαν αριθμητική προσομοίωση του ρευστοδυναμικού προβλήματος σε συνδυασμό και αλληλεπίδραση με μη-γραμμική ανάλυση μετατοπίσεων (στροφών), όπως περιγράφεται αναλυτικά στην *Παράγραφο 3.4*. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για δυο περιπτώσεις κάλυψης του πλαισίου, για αδιαπέραστο πλαστικό και για γεωργικό δίχτυ πορώδους 62%.

Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων για την κλίση του πλαισίου ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, της αναλυτικής προσέγγισης μέσω του συνδυασμού μη-γραμμικής ανάλυσης – αριθμητικής προσομοίωσης και των μετρήσεων του πλήρους κλίμακας πειράματος ήταν σε συμφωνία και για τις δυο περιπτώσεις κάλυψης, πλαστικού και γεωργικού διχτυού. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν πολύ σημαντικό αφού καθιστούσε δυνατή την προσομοίωση ενός δυναμικού φαινομένου με τον σύνθετο αυτό τρόπο και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια για την προσομοίωση του εύκαμπτου πλαισίου. Επίσης το μοντέλο, όντας αξιόπιστο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση των πιέσεων πάνω στο πλαίσιο και των εντατικών μεγεθών στις στηρίξεις του πλαισίου.

Τα αποτελέσματα δεν ήταν εξίσου ικανοποιητικά στην περίπτωση του ελέγχου της προστασίας της υπήνεμης πλευράς του πλαισίου. Στην περίπτωση του πλαισίου με κάλυψη αδιαπέραστου πλαστικού οι τιμές των ταχυτήτων σε τρεις συγκεκριμένες θέσεις στην υπήνεμη περιοχή όπως υπολογίσθηκαν από την σύνθετη ανάλυση βρέθηκαν σε ασυμφωνία με τις μετρήσεις του πλήρους κλίμακας πειράματος. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε πως η αριθμητική προσομοίωση απεικονίζει το στρόβιλο στην υπήνεμη περιοχή να είναι μικρότερος σε μήκος (να καλύπτει μικρότερη έκταση) από ότι πραγματικά είναι, από ότι δηλαδή παρουσιάζει το πλήρους κλίμακας πείραμα. Το πρόβλημα έγκειται και πάλι στο μοντέλο τύρβης που

χρησιμοποιείται ( $k-\varepsilon$  RNG) το οποίο όπως και στην περίπτωση του υπερυψωμένου πλαισίου με κάλυψη πλαστικού, δεν μπορεί να απεικονίσει με ακρίβεια τη ροή του ανέμου σε θέσεις όπου παρουσιάζονται έντονα τυρβώδη φαινόμενα. Στην περίπτωση του πλαισίου με περατή κάλυψη δεν εμφανίστηκε ανάλογο πρόβλημα ασυμφωνίας και η προστασία της υπήνεμης περιοχής απεικονίζεται επακριβώς αριθμητικά, σε συμφωνία με τις μετρήσεις πλήρους κλίμακας.

Στη συγκεκριμένη μελέτη θα περίμενε κανείς το πλαίσιο του οποίου επιτρέπεται η κίνηση να υστερεί στην προστασία της υπήνεμης περιοχής εξαιτίας της ίδιας του της κίνησης αυτής. Για να υπάρξει μέτρο σύγκρισης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ταχύτητας ανέμου υπήνεμα και για πλαίσιο με στήριξη ελατηρίων υψηλής ελαστικής σταθεράς, ώστε να παραμένει ακίνητο. Οι μετρήσεις δείχναν αντίθετα με όσα ανέμενε κανείς πως το πλαίσιο με ελαστική στήριξη έχει καλύτερη προστατευτική ικανότητα από το ακίνητο πλαίσιο. Πρόκειται για ένα σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο δεν είχε προβλεφθεί κατά το σχεδιασμό της κατασκευής και μπορεί να αποδοθεί στην απόσβεση της κινητικής ενέργειας του ανέμου η οποία προκύπτει από τη δυναμική του φαινομένου. Να αναφερθεί πως η προστατευτική ικανότητα του περατού πλαισίου δεν αλλάζει είτε είναι ακίνητο είτε όχι το πλαίσιο γεγονός που οφείλεται στο υψηλό πορώδες του (62%).

Η αξιοπιστία του σύνθετου μοντέλου αριθμητικής προσομοίωσης – μη-γραμμικής ανάλυσης παρέχει τη δυνατότητα επιπρόσθετης επεξεργασίας και ανάλυσης και συγκεκριμένα τον υπολογισμό των πιέσεων που ασκούνται πάνω στο πλαίσιο σε κάθε περίπτωση κάλυψης στη θέση ισορροπίας (τελική θέση – σύγκλιση). Επίσης είναι εφικτός ο προσδιορισμός των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στο πλαίσιο ώστε να γίνουν εμφανή οποιαδήποτε μειονεκτήματα είτε πλεονεκτήματα της χρήσης ενός τέτοιου είδους πλαισίου. Να σημειωθεί ότι οι μεταβολές των τεμνουσών δυνάμεων και ροπών κάμψης είναι ίδιες με τις μεταβολές των ανεμοπιέσεων από τη στιγμή που το σύστημα είναι γραμμικά ελαστικό, λόγω χρήσης των ελατηρίων.

Παρατηρήθηκαν λοιπόν, σημαντικές μεταβολές στη μείωση των ανεμοπιέσεων για το πλαίσιο με ελαστική στήριξη συγκριτικά με το ακίνητο πλαίσιο και κυρίως για μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Για το μη περατό πλαίσιο βρέθηκε πως οι ανεμοπιέσεις μειώνονται κατά 15% για γωνία ισορροπίας ίση με  $30^\circ$ , η οποία προκύπτει από ταχύτητα ανέμου ίση με  $10\text{m/s}$  και κατάλληλη ελαστική στήριξη, ενώ οι μειώσεις αγγίζουν το 40% για την ίδια ταχύτητα ανέμου και κλίση ισορροπίας ίση με γωνία  $50^\circ$ . Οι μειώσεις αυτές είναι ίδιες και εξίσου σημαντικές και για τα εντατικά μεγέθη.

Αντίστοιχα για το περατό πλαίσιο και για ταχύτητα ανέμου ίση με  $10\text{m/s}$  με κατάλληλη ελαστική στήριξη μπορούσε να επιτευχθεί ισορροπία σε κλίση  $30^\circ$  με μείωση των ανεμοπιέσεων σε ποσοστό 28%, ενώ για ισορροπία στις  $35^\circ$  το ποσοστό αυτό αύξανε στο 35%. Συνεπώς, οι ανεμοπιέσεις παρουσίαζαν μεγαλύτερες μειώσεις στο περατό πλαίσιο για ίδιες γωνίες ισορροπίας συγκριτικά με το αδιαπέραστο πλαίσιο. Και εδώ οι μειώσεις στις τέμνουσες δυνάμεις και οι ροπές κάμψης ήταν ακριβώς ίδιες.

Παρά τις σημαντικές μειώσεις στις ανεμοπιέσεις, ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε στις αξονικές δυνάμεις παρουσίασε την αύξησή τους συγκριτικά με το ακίνητο πλαίσιο όπου είναι μηδενικές. Η αύξηση της αξονικής δύναμης με την αύξηση της κλίσης ισορροπίας, παρά την μείωση των ανεμοπιέσεων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στον δομικό σχεδιασμό του συστήματος. Θα πρέπει να εξετασθούν πιθανά προβλήματα λόγω της επίδρασης των αξονικών δυνάμεων στη μείωση της πλαστικής ροπής αντοχής και να γίνει πρόσθετος έλεγχος για καμπτικό λυγισμό. Πάντως, μόνο εάν οι αξονικές δυνάμεις είναι σημαντικές, η αύξησή τους με την

αύξηση της κλίσης ισορροπίας είναι πιθανόν να επηρεάσει τον τελικό σχεδιασμό των δομικών στοιχείων του πετάσματος και να μειώσουν σε κάποιο βαθμό την θετική επίπτωση της μείωσης των ανεμοπιέσεων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της κατασκευής του πειράματος πλήρους κλίμακας της εργασίας αυτής, η αύξηση της αξονικής δύναμης δεν επηρέασε καθόλου τον σχεδιασμό των δομικών στοιχείων με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η αύξηση της απόστασης των υποστυλωμάτων του πετάσματος ανάλογα με την μείωση των ανεμοπιέσεων.

Συνολικά το υπό μελέτη περατό πλαίσιο ελαστικής στήριξης βρέθηκε να πλεονεκτεί του μη περατού πλαισίου όσο αφορά τις μειώσεις των φορτίων ανέμου και τις αντίστοιχες μειώσεις για τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο δομικό σύστημα του πλαισίου. Αυτό συμπεραίνεται από το γεγονός πως για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου και για τις ίδιες γωνίες ισορροπίας, οι οποίες επιτυγχάνονται με κατάλληλη ελαστική στήριξη, το περατό πλαίσιο ελαστικής στήριξης έχει μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης των ανεμοπιέσεων ενώ παρουσιάζει και μικρότερο ρυθμό αύξησης των αξονικών δυνάμεων συγκριτικά με το μη περατό πλαίσιο ελαστικής στήριξης. Με την αύξηση της γωνίας κλίσης και για μια τιμή της και έπειτα, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το πορώδες του πλαισίου, οι αξονικές δυνάμεις παύουν να αυξάνουν και αρχίζουν να μειώνονται.

### **5.2.3 Συμπεράσματα της μελέτης της αλληλεπίδρασης του ανέμου με εύκαμπτο πλαίσιο.**

Όπως αναφέρθηκε, η προσομοίωση του συνολικού δυναμικού φαινομένου αλληλεπίδρασης του πλαισίου ελαστικής στήριξης με τα φορτία ανέμου πραγματοποιήθηκε με επιτυχία με τη βοήθεια ενός σύνθετου μοντέλου που συνδύαζε αριθμητική προσομοίωση του ρευστοδυναμικού προβλήματος και μη-γραμμική ανάλυση των μεγάλων μετατοπίσεων. Με βάση αυτή την ανάλυση μπορούσε να εξαχθεί η θέση ισορροπίας του συστήματος άνεμος – πλαίσιο ελαστικής στήριξης. Τα επιτυχή αποτελέσματα της σύνθετης ανάλυσης του πλαισίου ελαστικής στήριξης επέτρεψαν στη συνέχεια να αναπτυχθεί μια αντίστοιχη σύνθετη διαδικασία ανάλυσης με προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ενός εύκαμπτου πακτωμένου πλαισίου με τον προσπίπτοντα άνεμο.

Στόχος ήταν να αναδειχθεί η θετική όψη της χρήσης μιας τέτοιας εύκαμπτης κατασκευής. Αυτό συνεπαγόταν τη μείωση των εντατικών μεγεθών στην κατασκευή το οποίο μεταφράζετε σε μείωση του αρχικού κόστους της κατασκευής, αποφυγή ζημιών, βελτίωση αποδοτικότητας αλλά και αύξηση του χρόνου ζωής της. Η ανάλυση των καμπτικών ροπών πάνω στο εύκαμπτο πλαίσιο σε θέσεις ισορροπίας με τον άνεμο όπως προέκυπταν για διαφορετικές περιπτώσεις έντασης της λογαριθμικής κατανομής του ανέμου δείχνανε σημαντικές μειώσεις συγκριτικά με ένα δύσκαμπτο πλαίσιο. Το πλαίσιο του χάλυβα μελετήθηκε συγκριτικά σαν πλαίσιο αναφοράς. Στην περίπτωση λογαριθμικής κατανομής ταχύτητας με τιμή  $8m/s$  στα  $10m$  ύψος οι μέγιστες μειώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στη βάση της κατασκευής φθάνουν το 25%, ενώ για κατανομή με τιμή ταχύτητας στα  $10m$  ύψος ίση με  $10m/s$  οι μειώσεις αγγίζουν, και πάλι στη βάση της κατασκευής, το 40%. Οι μειώσεις μάλιστα φαίνεται αυξάνονται έντονα με την αύξηση της έντασης της κατανομής της ταχύτητας ακολουθώντας μιας καμπύλη δευτέρου βαθμού.

Επίσης μελετήθηκε ένα εύκαμπτο περατό πλαίσιο ώστε να αναλυθεί η συμπεριφορά και τα πιθανά πλεονεκτήματα μιας τέτοιας κατασκευής. Ο συνδυασμός εύκαμπτου και περατού υλικού φάνηκε να αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα όσο αφορά τις μειώσεις αφού για όλες τις περιπτώσεις κατανομών ταχύτητας (οι οποίες

μελετήθηκαν και στο μη περατό εύκαμπτο πλαίσιο) οι μέγιστες μειώσεις των καμπτικών ροπών ξεπερνούσαν το 60% και μάλιστα αυξάνουν γραμμικά καθώς η ένταση της κατανομής της ταχύτητας αυξάνει.

Η αποδοτικότητα βέβαια ενός πλαισίου εντοπίζεται στην προστατευτική ικανότητα της υπήνεμης περιοχής του. Μελετήθηκε η μεταβολή της ταχύτητας της υπήνεμης περιοχής (συγκριτικά με την προσήνεμη τιμή της ταχύτητας μακριά από το πλαίσιο) του εύκαμπτου περατού και μη πλαισίου και συγκρίθηκε με αντίστοιχα αποτελέσματα για το δύσκαμπτο πλαίσιο. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων παρουσίασε τις μεγαλύτερες μειώσεις να εντοπίζονται στην περίπτωση του δύσκαμπτου πλαισίου ενώ για την περίπτωση του εύκαμπτου περατού πλαισίου οι μειώσεις είναι πολύ μικρές. Σημαντικές μειώσεις παρατηρήθηκαν για το εύκαμπτο πλαίσιο κυρίως στα υπήνεμη περιοχή κοντά στο πλαίσιο και συγκεκριμένα ίδιες με του δύσκαμπτου για απόσταση  $x=3.5h$ , αν στη θέση  $x=0$  είναι το πλαίσιο, ενώ από τη θέση αυτή μέχρι  $x=7h$  οι μειώσεις ήταν κατά 20% μικρότερες. Τα αποτελέσματα αυτά προήλθαν από την αριθμητική προσομοίωση σταθερής κατάστασης (steady state) της τελικής θέσης του εύκαμπτου πλαισίου κατά τη σύγκλιση. Το δυναμικό φαινόμενο, όπως προαναφέρθηκε, δε μελετήθηκε συνολικά. Αυτό σημαίνει πως πιθανότατα οι μειώσεις της ταχύτητας υπήνεμα για το εύκαμπτο μη περατό πλαίσιο να είναι μεγαλύτερες, πράγμα που αποδείχθηκε στο πλήρους κλίμακας πείραμα του πλαισίου με ελαστική στήριξη, όπου υπήρχε απόσβεση της κινητικής ενέργειας του ανέμου εξαιτίας της μετατόπισης του πλαισίου. Είναι πολύ πιθανό να συμβαίνει και στην περίπτωση του εύκαμπτου πλαισίου κάτι αντίστοιχο.

Δεν μπορεί από τα παραπάνω όμως να εξαχθεί το συμπέρασμα πως το δύσκαμπτο πλαίσιο είναι το καλύτερο προστατευτικό μέσο και πως το περατό πλαίσιο είναι πρακτικά άχρηστο. Το είδος του πλαισίου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάθε φορά είναι μια σχετική απόφαση, όπως αναλύεται λεπτομερώς στην *Παράγραφο 4.6.3*, η οποία οφείλει να συνυπολογίζει παράγοντες όπως τι είναι αυτό που πρέπει να προστατευθεί, ποιο το μέγεθος της υπό προστασία περιοχής και σαφώς οικονομικοί παράγοντες.

### **5.3 Καινοτομικά Στοιχεία – Βασικοί Στόχοι**

Συνολικά, θα μπορούσε να πει κανείς πως η διατριβή αυτή αναπτύχθηκε σε τρία ερευνητικά στάδια.

Ένας από τους στόχους ήταν, σε κάθε ερευνητική δραστηριότητα που έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια των σχεδόν 4 ετών της διδακτορικής διατριβής, κάθε πειραματική προσπάθεια να συνοδεύεται από αντίστοιχη αριθμητική προσομοίωση. Θα ήταν ευχάριστο να καταλήγαμε στο συμπέρασμα πως σε κάθε αριθμητική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, τα αποτελέσματα ήταν σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων πλήρους κλίμακας. Παρόλα αυτά στις περισσότερες των περιπτώσεων οι αριθμητικές προσομοιώσεις αποδείχθηκαν ακριβείς, αναλύοντας πολύ καλά τα υπό εξέταση προβλήματα. Η χρήση τους όλο αυτό το διάστημα πραγματικά έδειξε την ευκολία που παρέχει ένα τέτοιο εργαλείο, από τη στιγμή που σχεδόν πάντα υπήρχε στον αντίποδα και αντίστοιχο πείραμα πλήρους κλίμακας ως μέτρο σύγκρισης.

Η μελέτη των περατών υλικών και κυρίως των γεωργικών δικτυών ήταν ένας δεύτερος εξίσου σημαντικός στόχος. Η χρήση των γεωργικών δικτυών και γενικότερα περατών κατακόρυφων πλαισίων αυξάνει συνεχώς βρίσκοντας πολλές και διαφορετικού τύπου εφαρμογές. Τα γεωργικά δίχτυα δεν έχουν μελετηθεί ιδιαίτερα και μέχρι πρότινος η αλληλεπίδρασή τους με τα φορτία ανέμου αντιμετωπιζόταν

εμπειρικά. Από την άλλη τα περατά πλαίσια εν γένει έχουν μελετηθεί, όμως ο έλεγχος της διεθνούς βιβλιογραφίας παρουσίασε σημαντικές ασυμφωνίες ανάμεσα σε προηγούμενες ερευνητικές μελέτες. Αυτό που πρέπει να επισημανθεί για μια ακόμη φορά είναι πως ίσως θα ήταν συνετό να επανεξετασθεί ο συσχετισμός των φορτίων ανέμου πάνω σε τέτοια πλαίσια μόνο με το πορώδες τους, κάτι που συναντά κανείς και σε όλους τους κατασκευαστικούς κώδικες. Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά δεν είναι τόσο απλά και χρειάζονται πιθανότατα περισσότεροι παράγοντες, όπως η γεωμετρική μορφή του περατού υλικού, για να χαρακτηρίσουν την αεροδυναμική και τη συμπεριφορά ενός τέτοιου υλικού κατά την αλληλεπίδραση του με τον άνεμο.

Ο βασικός στόχος όμως, ήταν η μελέτη εύκαμπτων υλικών σε γεωργικές κατασκευές με στόχο να αναδειχθούν πλεονεκτήματα τέτοιων κατασκευών. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με επιτυχία και έγινε εμφανές πως όσο αφορά τα φορτία ανέμου και κατ' επέκταση τα εντατικά μεγέθη, όπως αυτά αναπτύσσονται στο δομικό σύστημα του πλαισίου, υπάρχουν σημαντικές μειώσεις οι οποίες μπορούν να μεταφραστούν σε ασφάλεια, μείωση κόστους, αποφυγή ατυχημάτων και ζημιών που επιβαρύνουν οικονομικά αλλά και βελτίωση της αποδοτικότητας. Το τελευταίο βέβαια συνδυάζεται, στην περίπτωση των πλαισίων που εξετάστηκαν, με το πολύ σημαντικό κομμάτι της προστατευτικής ικανότητας. Επόμενος στόχος όσο αφορά αυτό το ερευνητικό αντικείμενο είναι να μελετηθούν διαφορετικά εύκαμπτα και περατά ή μη-περατά πλαίσια ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ τους και να διαφανεί η αποδοτικότητα του καθενός πάντα βέβαια σε συνάρτηση με το κόστος του. Η χρήση του υλικού *Plexiglas* για την μελέτη του εύκαμπτου πλαισίου ήταν απολύτως θεωρητική και δεν έχει γίνει συνολική μελέτη για τον σχεδιασμό μιας πραγματικής εύκαμπτης κατασκευής για ανάλογες εφαρμογές. Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά σαν αναλυτικό εργαλείο για το συγκεκριμένο στάδιο της έρευνας ώστε να αναλυθεί η συμπεριφορά και να προσδιορισθούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί ενός πλαισίου με την ικανότητα να κάμπτεται σημαντικά.

Για πρακτικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων της έρευνας θα χρειαστεί να πραγματοποιηθεί μια τεχνο-οικονομική μελέτη σχεδιασμού εύκαμπτου πλαισίου η οποία θα συνυπολογίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μιας τέτοιας κατασκευής, όπως αυτά αναδείχθηκαν στο ερευνητικό τμήμα της παρούσας διατριβής και κυρίως θα μελετά την αποδοτικότητά της σε βάθος χρόνου. Περνώντας από την έρευνα στην εφαρμογή και συνυπολογίζοντας σαν εξίσου βασικό παράγοντα το κόστος, μπορεί να γίνει εμφανές κατά πόσο είναι εφικτό να αξιοποιηθεί στην πράξη η παρούσα ερευνητική δουλειά. Μετά από την έρευνα και εμπειρία αυτών των ετών, πάνω σε τέτοιου είδους εύκαμπτες ή ελαστικής στήριξης κατασκευές πιστεύουμε ότι η πιθανή εφαρμογή τους για ένα υλικό με την υψηλή τιμή ελαστικότητας και αντοχής μπορεί να αποδειχθεί αποδοτικότερη και οικονομικότερη από ότι οι συνήθεις σταθερές κατασκευές.

**Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης και συγχρηματοδοτείται κατά:**

- 80% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
- 20% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας

Γ' ΚΟΙΝΟΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



**ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ**



ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

## 6. Αναφορές

- [1] Good M.C., Joubert P.N. The drag form of two dimensional bluff-plates immersed in turbulent boundary layers. *J Fluid Mech* 1968; 31: 547-582
- [2] Bearman P.W. An investigation of the forces on flat plates normal to a turbulent flow. *J Fluid Mech* 1971; 46: 177-198
- [3] Ranga Raju K.G., Loeser J., Plate E.J. Velocity profiles and fence drag for a turbulent boundary layer along smooth and rough flat plates. *J Fluid Mech* 1976; 76: 383-399
- [4] Jacobs A.F.G. The normal-force coefficient of a thin closed fence. *Boundary-layer meteorology* 1985; 32: 329-335
- [5] Letchford C.W., Holmes J.D. Wind loads on free-standing walls in turbulent boundary layers. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1994; 51: 1-27
- [6] Robertson A.P., Hoxey R.P., Richards P.J. Design code, full-scale and numerical data for wind loads on free-standing walls. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1995; 57: 203-214
- [7] Robertson A.P., Hoxey R.P., Short J.L., Ferguson W.A., Osmond S. Full-scale testing to determine the wind loads on free-standing walls. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1996; 60: 123-137
- [8] Robertson A.P., Hoxey R.P., Richards P.J., Ferguson W.A. Full-scale measurements and computational predictions of wind loads on free-standing walls. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1997; 67 & 68: 639-646
- [9] Robertson A.P., Hoxey R.P., Short J.L., Ferguson W.A., Blackmore P.A. Wind loads on boundary walls: Full-scale studies. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1997; 69-71: 451-459
- [10] Robertson A.P., Hoxey R.P., Short J.L., Ferguson W.A., Blackmore P.A. Prediction of structural loads from fluctuating wind pressures: Validation from full-scale force and pressure measurements. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1998; 74-76: 631-640
- [11] Letchford C.W., Robertson A.P. Mean wind loading at the leading ends of free standing walls. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1999; 79: 123-134
- [12] Seginer I. Flow around a wind break in oblique wind. *Boundary-Layer Meteorology* 1975; 9: 133-141
- [13] Richardson G.M. A permeable windbreak: Its micro-environment and its effect on structural loads. *J Agric Engng Res* 1987; 38: 65-76
- [14] Ranga Raju K.G., Garde R.J., Singh S.K., Singh N. Experimental study on characteristics of flow past porous fences. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1988; 29: 155-163
- [15] Fang F.M., Wang D.Y. On the flow around a vertical porous fence. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1997; 67 & 68: 415-424
- [16] Richards P.J., Robinson M. Wind loads on porous structures. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1999; 83: 455-465
- [17] Packwood A.R. Flow through porous fences in thick boundary layers: comparisons between laboratory and numerical experiments. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2000; 88: 75-90
- [18] Letchford C.W. Wind loads on rectangular signboards and hoardings. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2001; 89: 135-151
- [19] Quinn A.D., Baker C.J., Wright N.G. Wind and vehicle induced forces on flat plates – Part 1: wind induced force. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2001; 89: 817-829
- [20] Paulotto C., Ciampoli M., Augusti G. Wind tunnel evaluation of mean wind

- pressure on a frame-type signboard. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2006; 94: 397-413
- [21] CEN (2005). EN 1991-1-4:2005 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1-4: General actions – Wind actions 1-1-4. Comite Europeen de Normalisation, Brussels
- [22] ANSI (2006), ANSI Standard: ANSI/SEI 7-05, 2006, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, The American National Standards Institute (ANSI), New York, N.Y.
- [23] Briassoulis D., Mistriotis A. Full-scale measurement of the wind force on an elevated panel covered with flexible permeable or impermeable materials. Internal report.
- [24] Giannoulis A., Briassoulis D., Mistriotis A. On the airflow around an elevated panel of different permeabilities: Full-scale experiment and numerical simulation. Submitted in *J Wind Eng Ind Aerodyn*.
- [25] Lage J.L., *Transport Phenomena in Porous Media, The fundamental theory of flow through permeable media from Darcy to turbulence*, p 1-31, in edited by D.B. Ingham & I. Pop, Pergamon Press (1998), Oxford.
- [26] Hemming S., Campen, J, Waaijenberg D., Testing of air permeability performance of agricultural nets., Internal report, Agrotechnology and Food Innovations B.V., Wageningen UR, Wageningen, The Netherlands. 2005
- [27] Holmes J.D. Wind loading of parallel free-standing walls on bridges, cliffs embankments and ridges. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2001; 89: 1397-1407
- [28] Guan D., Zhang Y., Zhu T. A wind-tunnel study of windbreak drag. *J Agric Forest Meteorology* 2003; 118: 75-84
- [29] Raine J.K., Stevenson D.C., Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1977; 2: 159-180
- [30] Perera M.D.A.E.S., Shelter behind two-dimensional solid and porous fences. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1981; 8: 93-104
- [31] Bradley E.F., Mulhearn P.J., Development of velocity and shear stress distributions in the wake of a porous shelter fence. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1983; 15: 145-156
- [32] Heisler G.M., Dewalle D.R., Effects of windbreak structure on wind flow. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1988; 22-23: 41-69
- [33] Gupta V.J., Ranga Raju K.G., Separated flow in the lee of solid and porous fences. *J. Hyd. Eng.* 1987; 113: 1264-1276
- [34] Yaragal S.C., Ram G.H.S., Murthy K.K., An experimental investigation of flow fields downstream of solid and porous fences. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1997; 66: 127-140
- [35] Lee S.J., Park C.W., Surface-pressure variations on a triangular prism by porous fences in a simulated atmospheric boundary layer. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1998; 73: 45-58
- [36] Shiau B.S., Measurements of turbulence characteristics for flow past porous screens. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1998; 74-76: 521-530
- [37] Lee S.J., Kim H.B., Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fence. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1999; 80: 311-326
- [38] Dong Z., Luo W., Qian G., Wang H., A wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fences. *Agric. Forest Meteorology* 2007; 146: 82-93
- [39] Park C.W., Lee S.J., The effects of a bottom gap and non-uniform porosity in a wind fence on the surface pressure of triangular prism located behind the the fence. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2001; 89: 1137-1154
- [40] Kim H.B., Lee S.J., The structure shear flow around a two-dimensional porous



- fence having a bottom gap. *J Fluid Structures* 2002; 16(3): 317-329
- [41] Awbi H.B., *Ventilation in buildings*. Chapter 7. E & FN Spon, London, G. Britain. 1991
- [42] Lage J.L., *The Fundamental Theory of Flow through Permeable Media from Darcy to Turbulence*, p 1-31, in “*Transport Phenomena in Porous Media*” edited by D.B. Ingham & I. Pop, Pergamon Press (1998), Oxford.
- [43] P.J. Richards, R.P. Hoxey, *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model*, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 1993; 46 & 47:145-153.
- [44] Hemming S., Campen, J, Waaijenberg D. *Testing of air permeability performance of agricultural nets*. Internal report, Agrotechnology and Food Innovations B.V., Wageningen UR, Wageningen, The Netherlands, 2005.
- [45] Durst C.S. *Wind speeds over short periods of time*. *Meteorol. Mag.* 1960; 89: 181-186